

Eine quantitative Analyse europäischer Richtlinien und Verordnungen zur Abfall- und Kreislaufwirtschaft am Beispiel der Elektro- und Elektronikindustrie

Implikationen und Empfehlungen für eine transnationale Umweltpolitik

Christian Nuss, Dennis Stindt, Ramin Sahamie und Axel Tuma, Augsburg

Kurzzusammenfassung

Richtlinien und Verordnungen zur Abfall- und Kreislaufwirtschaft sind zentrale Bausteine des europäischen Umweltrechts. Die vorliegende Arbeit identifiziert Zielkonflikte, welchespeziell im Spannungsfeld zwischen der Abfallverbringungsverordnung (AbfVerbrVO) und der WEEE-Richtlinie (WEEE-RL) vermutet werden. Es existieren Hinweise, dass hierdurch eine hochwertige Aufbereitung von WEEE – im Sinne eines Reuse, Remanufacturing oder Retrieval – in einem europäischen Binnenmarkt behindert wird. Dies deckt sich mit den Erfahrungen involvierter Industrieunternehmen. Zur Analyse der Auswirkungen der Gesetzgebung wird ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell entworfen. Neben klassischen ökonomischen Faktoren sind rechtliche Aspekte sowohl in der Zielfunktion als auch in den Restriktionen des Modells integriert. In Szenarien werden gesetzliche Ausgestaltungen zur transnationalen Verbringung von WEEE analysiert und deren Auswirkungen auf die optimale Sammel- und Aufbereitungspraxis aufgezeigt. Grundlage bildet eine auf Realdaten basierende Fallstudie, die in Kooperation mit einem global agierenden IT-Hersteller durchgeführt wurde. Abschließend werden aus den Ergebnissen der Szenarioanalyse Handlungsempfehlungen für betriebliche und politische Entscheider abgeleitet.

1. Einleitung

Jährlich fallen weltweit schätzungsweise 20 bis 50 Millionen Tonnen elektrische und elektronische Geräte als Abfall an (Dindarian et al., 2012; Robinson, 2009). Kürzere Produktlebenszyklen und wachsender Wohlstand machen WEEE (Waste of Electrical and Electronic Equipment) zu einem der am stärksten wachsenden Abfallströme weltweit (Quariguasi Frota Neto und van Wassenhove, 2013). In Europa beträgt der Anteil an WEEE rund 13 Prozent des gesamten Abfallaufkommens und steigt pro Jahr mit 3–5 Prozent (Abu Bakar und Rahimifard, 2008; Eurostat, 2015; Goosey, 2004).

Zum Umgang mit diesen Abfallströmen wurden in den vergangenen Jahren zahlreiche Gesetze und Verordnungen erlassen. Diese zielen im Allgemeinen darauf ab, die Altprodukte einer geregelten Verwertung, zum Beispiel in Form von Wiederverwendung oder Recycling, zuzuführen. Die Tatsache, dass WEEE in vielen Fällen umweltbelastende Substanzen enthält, welche einer adäquaten Behandlung bedürfen, ist dabei ein zentraler Treiber. Weiterhin soll die Ressourceneffizienz durch Recycling der Rohstoffe erhöht und so natürliche Ressourcenvorräte durch Einsatz der Sekundärrohstoffe geschont werden. Dies betrifft sowohl Massenrohstoffe wie Kupfer und Eisen als auch seltene Metalle (z. B. Gold, Palladium, Platin, Rhodium). Schätzungen zufolge konnten seit der Einführung der erweiterten Herstellerverantwortung in Europa durch die Aufbereitung von WEEE rund 16 Tonnen Gold, 130 Tonnen Silber und 160.000 Tonnen Kupfer zurückgewonnen sowie rund 20 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente eingespart werden (Kunz et al., 2014). Die erweiterte Herstellerverantwortung verpflichtet Hersteller, Produkte nach Ende der Lebens- oder Nutzungsphase zurückzunehmen beziehungsweise die Rücknahme durch Dritte zu organisieren und zu finanzieren. Als Resultat der korrespondierenden Umweltgesetzgebung (z. B. WEEE-RL) sehen sich die involvierten Akteure mit der Herausforderung konfrontiert, Systeme zur adäquaten Verwertung und Entsorgung zu entwickeln und effizient zu betreiben.

Ein Blick in die Praxis offenbart jedoch, dass das umweltpolitische Ziel, welches in der Abfallhierarchie (AbfRRL, 2008) zum Ausdruck gebracht wird, nicht erreicht wird. So scheuen Hersteller von IT-Equipment eine eigene Sammlung ihrer Altprodukte. Stattdessen ist die Beauftragung von Dienstleistern der Abfallwirtschaft üblich. Auf diesem Weg werden die Altprodukte in der Regel dem Recycling zugeführt (Abu Bakar und Rahimifard, 2008; Alumur et al., 2012). Entsprechend ist eine hochwertige Aufbereitung, beispielsweise in Form von Reuse, Remanufacturing oder Retrieval, deutlich weniger verbreitet als durch wissenschaftliche Literatur zumeist suggeriert wird (Oraiopoulos et al., 2012). Dies ist insbesondere bedenklich, da Recycling von WEEE aus ökologischer Sicht nachteilig gegenüber der hochwertigen Aufbereitung ist (Quariguasi Frota Neto et al., 2010; Zoeteman et al., 2009). Als Gründe für die Zurückhaltung bei der Etablierung eigener Sammel- und Aufbereitungssysteme werden zumeist folgende angegeben: Solche Systeme führen zu einer komplexen Kostenstruktur, induzieren signifikante administrative Aufwendungen und werden bei den Herstellern zudem als rechtliche Grauzone wahrgenommen (Kunz et al., 2014; Quariguasi Frota Neto und van Wassenhove, 2013). Bezüglich des letzten Punktes wird sowohl seitens der Industrie als auch in der wissenschaftlichen Literatur (Jayaraman und Luo, 2007) und sogar von Seiten des Umweltministeriums als Teil der Exekutive (Anlaufstellen-Leitlinie 1, 2007) immer wieder auf die Komplexität und teilweise Inkonsistenz bei Regelungen zur transnationalen Verbringung von Altprodukten verwiesen. Dies betrifft vor allem die AbfVerbrVO, wie später näher erläutert wird. Franke et al. (2006) führen Transportrestriktionen als eine der zentralen Herausforderungen in Produktaufbereitungsprogrammen an. Dieser Erkenntnis zum

Eine quantitative Analyse europäischer Richtlinien und Verordnungen ZfU 1/2016, 37–69 zur Abfall- und Kreislaufwirtschaft am Beispiel der Elektro- und Elektronikindustrie

Trotz fand die Analyse von internationalen Sammel- und Aufbereitungsnetzwerke unter Berücksichtigung der rechtlichen Rahmenbedingungen kaum Beachtung in der wissenschaftlichen Literatur.

Vor diesem Hintergrund untersucht die vorliegende Arbeit die Effektivität von europäischen Gesetzen und Richtlinien im Spannungsfeld der Rücknahme und Verwertung von WEEE sowie der transnationalen Verbringung dieser Abfälle. Durch Darstellung und Analyse der legislativen Grundlagen wird ein Zielkonflikt identifiziert, welcher im Widerspruch zu den ursprünglichen Intentionen der Umweltgesetzgebung steht und letztlich die gewünschte Etablierung von ökologisch und ökonomisch effizienten Kreislaufwirtschaftssystemen behindert. In der Folge findet keine herstellereigene Rücknahme und hochwertige Aufbereitung von WEEE statt und somit entfallen die gewünschten Anreize zur ökoefizienten Produktgestaltung (Özdemir et al., 2012; Toffel, 2003). Auf Basis dieser Beobachtungen konnten drei Forschungsfragen abgeleitet werden:

Forschungsfrage 1: Welches ist die optimale Strategie für einen IT-Hersteller zur Etablierung eines europäischen Sammel- und Aufbereitungsnetzwerks unter expliziter Berücksichtigung der gesetzlichen Rahmenbedingungen im Status Quo?

Forschungsfrage 2: Welchen Einfluss hat die europäische Umweltgesetzgebung, insbesondere zur transnationalen Abfallverbringung, auf die strategische Gestaltung der Sammel- und Aufbereitungsaktivitäten?

Forschungsfrage 3: Welche Änderungen der legislativen Rahmenbedingungen können eine Steigerung der Quote hochwertiger Aufbereitung von IT-Geräten induzieren?

Da WEEE eine sehr heterogene Produktlandschaft umfasst, welche von Waschmaschinen bis hin zu Photovoltaik modulen reicht, fokussiert sich die vorliegende Analyse auf IT-Equipment. Die Auswahl dieser Produktgruppe wurde getroffen, da erstens eine hochwertige Aufbereitung durch die Hersteller kaum stattfindet, zweitens diese Produktgruppe einen Anteil von rund 20 Prozent an WEEE repräsentiert (Eurostat, 2015) und drittens diese Produkte aus Sicht der Ressourcen- und Umwelt-effizienz einen interessanten Betrachtungsgegenstand darstellen, da sie in der Regel eine hohe Konzentration an seltenen und umweltbelastenden Materialien aufweisen (Chancerel und Rotter, 2009; Dimitrakakis et al., 2009; Johnson et al., 2007; Robinson, 2009). Darüber hinaus zählt in diesem Industriezweig die Entwicklung hochwertiger Aufbereitungssysteme zu einer der zentralen Herausforderungen im Rahmen einer nachhaltigen Unternehmensführung (Fleischmann et al., 2003; Wu und Pagell, 2011).

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wird ein europäisches Rückholungs- und Aufbereitungsnetzwerk durch ein gemischt-ganzzahliges mathematisches Modell abgebildet, welches sowohl ökonomische Aspekte als auch legislative Rahmenbedingungen beinhaltet. Die Parametrisierung des Modells erfolgt mit Realdaten, welche größtenteils aus der Kooperation mit einem weltweit agierenden IT-Hersteller stammen. Ausgehend von verschiedenen Szenarien wird der aktuell in der Gesetzgebung

vorhandene Zielkonflikt zwischen der Reglementierung grenzüberschreitender Abfallverbringung und einer hochwertigen Aufbereitung von WEEE verdeutlicht. Auf Basis der quantitativen Untersuchung werden Handlungsempfehlungen sowohl für politische Entscheidungsträger als auch für Unternehmen abgeleitet.

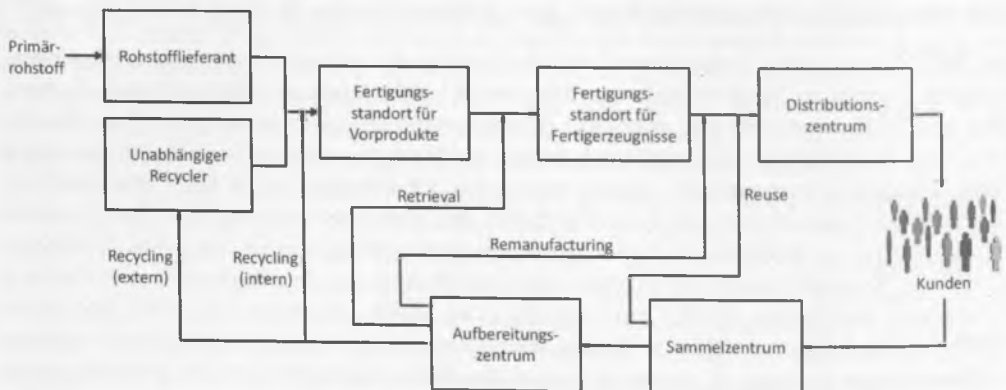
2. Theoretische Grundlagen

Im folgenden Kapitel wird die grundlegende Struktur von Kreislaufwirtschaftssystemen skizziert. Daraufhin werden für die Kreislaufwirtschaft relevante Rechtsnormen dargestellt und potentielle Effizienzverluste bei der Umsetzung von Kreislaufwirtschaftsstrategien sowie Zielkonflikte innerhalb des Rechtsrahmens herausgearbeitet.

2.1 Kreislaufwirtschaftssysteme aus betriebswirtschaftlicher Sicht

Die Etablierung von Kreislaufwirtschaftssystemen gilt als ein Eckpfeiler nachhaltiger Entwicklung (de Brito und Dekker, 2004). Die Schonung natürlicher Ressourcen, die Reduzierung der Abfallmengen und Emissionen und die grundsätzliche Minderung der anthropogene Umweltbelastungen werden regelmäßig als Resultate solcher Systeme genannt (Stindt und Sahamie, 2014). Abbildung 1 stellt ein idealtypisches Kreislaufwirtschaftssystem samt der notwendigen Infrastruktur und der potentiellen Aufbereitungswege für die Produktrückläufer dar.

Abbildung 1: Idealtypisches Kreislaufwirtschaftssystem

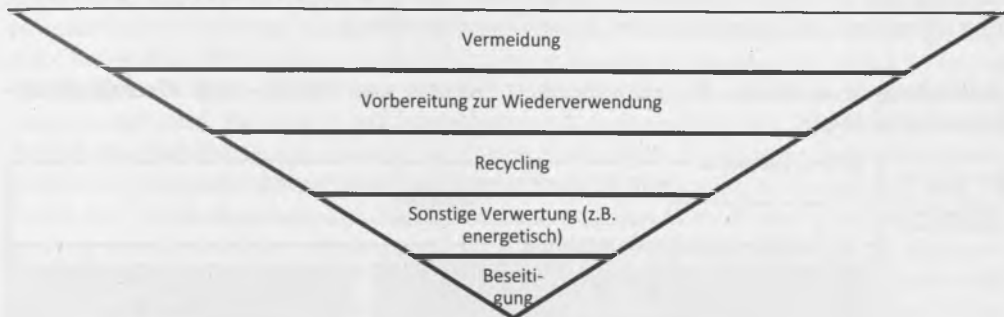


Das Ziel einer Kreislaufwirtschaft ist die Sammlung ausgedienter Produkte vom Kunden zum Zweck der Aufbereitung. In Abhängigkeit des implementierten Aufbereitungsprozesses werden in der Literatur vier Aufbereitungsoptionen genannt, die sich bezüglich der Behandlungstiefe in Bezug auf das Produkt unterscheiden. **Recycling** zielt auf die Rückgewinnung der in den Altprodukten eingesetzten Rohstoffe ab. Im Gegensatz zu diesem Prozess bleibt bei den höherwertigen Aufbereitungsstufen

Eine quantitative Analyse europäischer Richtlinien und Verordnungen ZfU 1/2016, 37–69 zur Abfall- und Kreislaufwirtschaft am Beispiel der Elektro- und Elektronikindustrie

die Grundform des Produkts beziehungsweise der Komponenten erhalten. So werden Altprodukte beim **Retrieval** demontiert, um Ersatzteile und Sekundärkomponenten zu entnehmen. Im Rahmen des **Remanufacturing** wird das Altprodukt durch Reparaturen in den Ausgangszustand zurückversetzt. Beim **Reuse** wird das Altprodukt ohne zusätzliche Wertschöpfung direkt wiedervermarktet (de Brito und Decker, 2004). Diese Prozesse können in der Abfallhierarchie, welche Gegenstand der Abfallrahmenrichtlinie ist (AbfRRL, 2008, Art. 4), eingeordnet werden (siehe Abbildung 2). So sind die Prozesse Remanufacturing und Reuse der Vorbereitung zur Wiederverwendung zuzuordnen. Dass Retrieval hingegen ist zwischen dem Recycling und der Wiederverwendung zu verorten, da in der Regel Teile des Produkts wiederverwendet werden und die übrigen Fraktionen dem Recycling zugeführt werden.

Abbildung 2: Abfallhierarchie



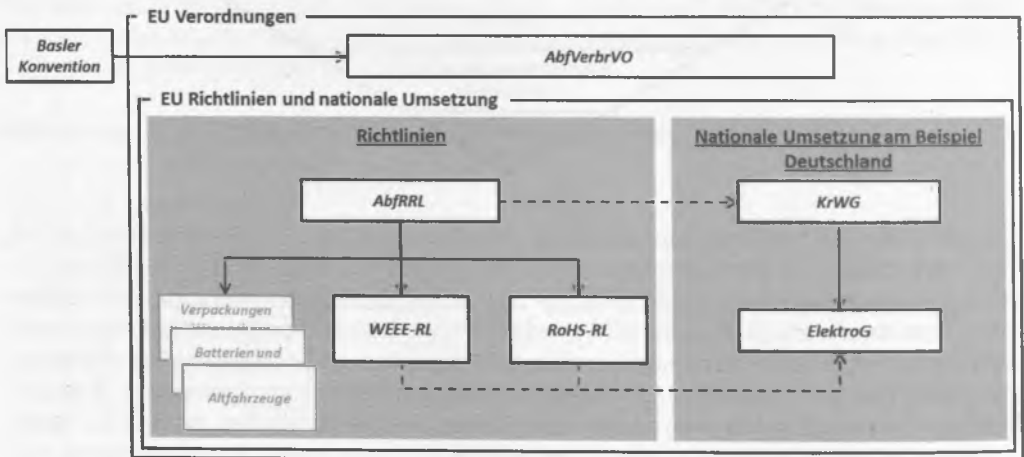
Die Wahl der Aufbereitungsoption hängt dabei von der Qualität der Rückläufer, dem Geschäftsmodell des sammelnden Unternehmens sowie schlussendlich der Rentabilität der Investitionen in ein Sammlungs- und Aufbereitungsnetzwerk ab. Der Aufbau eines Kreislaufwirtschaftssystems verursacht hohe Investitionen und operative Aufwendungen. Aus unternehmerischer Sicht ist zwischen einem dezentralen Netzwerk mit Nähe zum entsorgenden Akteur und einem zentralisierten System zur Realisierung von Skaleneffekten abzuwägen. Um diesem gerecht zu werden, wird in der Regel ein zweistufiges Netzwerk gebildet, bestehend aus dezentralen Sammelzentren und zentralisierten Aufbereitungsstandorten.

Ökonomische Anreize, positive Reputationseffekte und die Erfüllung legislativer Anforderungen sind die Haupttreiber für Unternehmen in ein Kreislaufwirtschaftssystem zu investieren (de Brito und Dekker, 2004). Legislative Maßnahmen werden insbesondere dann ergriffen, wenn Marktmechanismen eine Produktrücknahme und -verwertung nicht in dem Maß herbeiführen, wie es aus gesamtwirtschaftlicher, gesellschaftlicher oder umweltpolitischer Perspektive wünschenswert wäre (Cahill et al., 2010).

2.2 Legislative Rahmenbedingungen

Vorrangiges Ziel des europäischen Umwelt- und untergeordneten Abfallrechts ist die Eindämmung der Gefahren für den Menschen und die natürliche Umwelt sowie die Reduktion der Abhängigkeit von Rohstoffen (Reese, 2009). Entsprechend werden in der AbfRRL „Maßnahmen zum Schutz der Umwelt und der menschlichen Gesundheit festgelegt, indem die schädlichen Auswirkungen der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen vermieden oder verringert, die Gesamtauswirkungen der Ressourcennutzung reduziert und die Effizienz der Ressourcennutzung verbessert werden“ (AbfRRL, 2008, Art. 1). Mit dieser Zielsetzung sind die Rücknahme, der Transport und die Aufbereitung von Abfällen von WEEE innerhalb der europäischen Union durch diverse Richtlinien, Verordnungen und das zur Umsetzung erlassene nationale Recht geregelt. Die für die vorliegende Studie wesentlichen legislativen Grundlagen werden im Folgenden dargestellt. Abbildung 3 gibt einen Überblick über diese Rechtsgrundlagen und setzt sie in Zusammenhang.

Abbildung 3: Struktur der europäischen Gesetze zur Abfall- und Kreislaufwirtschaft (Auswahl)



Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG, 2012): Das Kreislaufwirtschaftsgesetz ist eine Folge der europäischen Abfallrahmenrichtlinie (AbfRRL, 2008). Es dient der Förderung der Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen und der Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. Hierzu nimmt das KrWG die Abfallhierarchie auf (KrWG, 2012, § 6), die bereits in Abbildung 2 dargestellt wurde. Durch Quotierung ist die Mindestmenge der Siedlungsabfälle, die dem Recycling oder der Wiederverwendung zuzuführen sind, vorgegeben. Die aktuelle Zielquote beträgt 60 Prozent des Siedlungsabfalls. Verantwortlich für die geordnete Sammlung und Verwertung der Abfallerzeugnisse sind zu einem Teil die Kommunen und

Eine quantitative Analyse europäischer Richtlinien und Verordnungen ZfU 1/2016, 37–69 zur Abfall- und Kreislaufwirtschaft am Beispiel der Elektro- und Elektronikindustrie

im Rahmen der erweiterten Herstellerverantwortung Entwickler, Hersteller, Be- oder Verarbeiter sowie Verkäufer. Darüber hinaus sind Produkte im Einklang mit der Öko-design-Richtlinie (ÖkoD-RL, 2009) möglichst so zu gestalten, dass bei ihrer Herstellung und ihrem Gebrauch das Entstehen von Abfällen vermindert wird und sichergestellt ist, dass die nach ihrem Gebrauch entstandenen Abfälle umweltverträglich verwertet oder beseitigt werden können.

Richtlinie über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (WEEE-RL, 2012): In der WEEE-RL werden die Ziele der allgemeinen Abfallrahmenrichtlinie für WEEE konkretisiert (Art. 1). Dies soll vorrangig durch „die Vermeidung von Abfällen von Elektro- und Elektronikgeräten und darüber hinaus durch Wiederverwendung, Recycling und andere Formen der Verwertung solcher Abfälle“ erreicht werden (WEEE-RL, 2012, ErwG 6). In diesem Sinne wird das Konzept der erweiterten Herstellerverantwortung eingeführt. Hiermit ist unter anderem die Hoffnung verbunden, auf diese Weise Innovationsanreize zusetzen, die zu einem verwertungsgerechten Design der Produkte führen (Art. 4). Die WEEE-RL unterscheidet zehn Sammelkategorien (Anhang I), wobei die im Rahmen der vorliegenden Arbeit fokussierte IT-Geräte der Sammelkategorie 3 zuzuordnen sind. Bezüglich der Sammlung und Aufbereitung der Altgüter bietet die WEEE-RL Handlungsspielräume. Es ist den Herstellern überlassen, individuelle oder kollektive Sammelsysteme beziehungsweise hybride Netzwerke zu etablieren (Art. 5). So ist der Hersteller zwar für die Rücknahme und geordnete Entsorgung und Aufbereitung der Rückläufer zuständig, kann diese Aufgabe jedoch durch Drittunternehmen durchführen lassen. Im Rahmen der WEEE-RL werden Mindestzielvorgaben für den kumulierten Gesamtanteil aus Vorbereitung zur Wiederverwendung und Rezyklierung definiert (Anhang V). Es werden keine expliziten Mindestzielvorgaben für die Quote der Vorbereitung zur Wiederverwendung vorgeschrieben. In Deutschland wurde die WEEE-RL durch das ElektroG in nationales Recht umgesetzt. Ein detaillierter Überblick über die spezifischen Umsetzungen der WEEE-RL in anderen europäischen Staaten wird in Cahill et al. (2010) sowie Mayers (2007) gegeben.

Richtlinie zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (RoHS-RL, 2011): Die RoHS (Restriction of Hazardous Substances)-RL soll durch die Beschränkung der Verwendung gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten zum Schutz der menschlichen Gesundheit und zu einer umweltgerechten Verwertung und Beseitigung beitragen. Somit ergänzt die RoHS-RL das europäische Abfallrecht sowie das europäische Recht der Chemikalienregulierung, insbesondere die REACH-Verordnung (REACH-VO, 2006). Wie die WEEE-RL wurde die RoHS-RL durch das ElektroG in deutsches Recht umgesetzt.

Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (ElektroG, 2015): Beim ElektroG handelt es sich um die deutsche Umsetzung der WEEE-RL sowie der RoHS-RL. Entsprechend regelt das ElektroG in Deutschland das Inverkehrbringen, die Verwertung als auch die Entsorgung von WEEE. Das Gesetz nimmt Hersteller und Importeure sol-

cher Gerätschaften in die Verantwortung mit dem Ziel, die zu beseitigende Abfallmenge und den damit verbundenen Schadstoffeintrag in die Umwelt aus Elektroaltgeräten zu reduzieren. Zur Erreichung dieses Ziels müssen Hersteller von Elektrogeräten für die Rücknahme als auch Verwertung solcher Produkte Sorge tragen. Grundsätzlich ist es in Deutschland den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern auferlegt, WEEE aus privaten Haushalten kostenlos zu sammeln und zur Abholung durch die Hersteller bereitzustellen (§ 9). Bei WEEE von Geschäftskunden (B2B) müssen die Hersteller gesonderte Möglichkeiten zur Rücknahme schaffen (§ 10).

Abfallverbringungsverordnung (AbfVerbrVO, 2006): Die AbfVerbrVO setzt die internationale Basler Konvention über die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle und ihrer Entsorgung in europäische Rechtsvorschriften um. Dies drückt sich auch dadurch aus, dass diverse Inhalte, wie beispielsweise die Abfalllisten (u. a. Anhang V, Teil 1, Listen A und B) direkt auf die korrespondierenden Anlagen der Basler Konvention verweisen. Das Ziel der AbfVerbrVO ist die Regulierung der transnationalen Verbringung von Abfällen um Risiken durch die Verbringung umweltgefährdender Abfälle zu verringern. Dabei sind die „Auswirkungen auf den internationalen Handel [...] zweitrangig“ (AbfVerbrVO, 2006, ErwG 1). Die Verordnung regelt sämtliche grenzüberschreitenden Abfallverbringungen, an denen EU-Staaten beteiligt sind. Prinzipiell kann hier zwischen der Verbringung innerhalb der europäischen Gemeinschaft (Titel II) und der Ausfuhr in Drittstaaten (Titel IV) differenziert werden. Da in der vorliegenden Untersuchung der europäische Binnenmarkt untersucht wird, fokussieren sich die weiteren Ausführungen auf Verbringungen innerhalb der EU. Die Verpflichtungen, die sich aus der Verordnung ergeben, unterscheiden sich bezüglich der Zusammensetzung des jeweiligen Abfallstroms, dessen Verwertungs- bzw. Entsorgungspfads sowie der an der Verbringung beteiligten Staaten, inklusive Transitstaaten. Die AbfVerbrVO differenziert zwischen auf der „grünen“ Abfallliste (Anhang III) geführten Abfällen, deren Verbringung den allgemeinen Informationspflichten unterliegt (Art. 18), und auf der „gelben“ Abfallliste (Anhang IV) geführten Abfällen, deren Verbringung dem Verfahren der schriftlichen Notifizierung und Zustimmung unterliegt (Art. 4). Elektroaltgeräte sind nur dann Teil der „grünen“ Abfallliste, wenn die OECD-Einträge GC010 und GC020 auf sie zutreffen, sie also ausschließlich aus Metallen und Legierungen bestehen und sich zur Rückgewinnung von unedlen und Edelmetallen eignen (Anhang III, Teil I, Buchst. d und Teil II, GC010 und GC020). Weiterhin muss eine Kontaminierung durch Materialien mit gefährlichen Eigenschaften, beispielsweise solche der „gelben“ Abfallliste, ausgeschlossen werden können (Anhang III, Präambel). Besteht die Verpflichtung zur vorherigen schriftlichen Notifizierung und Zustimmung, so kann diese fallspezifisch in sogenannten Einzelnotifizierungen erfolgen oder es können Sammelnotifizierungen für mehrere gleichartige Verbringungen beantragt werden. Im letzteren Fall wird gefordert, dass Abfalleigenschaften ähnlich sind und die Transportwege sowie die Empfangsadresse und -anlage für alle in einer Sammelnotifizierung zusammengefassten Verbringungen gleich sind (Art. 13).

Eine quantitative Analyse europäischer Richtlinien und Verordnungen ZfU 1/2016, 37–69 zur Abfall- und Kreislaufwirtschaft am Beispiel der Elektro- und Elektronikindustrie

2.3 Potentielle Effizienzverluste bei der Umsetzung der WEEE-RL

Die Auswertung der geführten Interviews mit unternehmerischen Entscheidern aus der IT-Industrie sowie Erkenntnisse aus den nachfolgend genannten wissenschaftlichen Publikationen zeigen, dass zentrale Zielsetzungen des europäischen Umweltrechts, insbesondere der WEEE-RL, nicht erreicht werden. Hierbei sind statische und dynamische Ineffizienzen zu unterscheiden (Elmer et al., 2005). Erstere beziehen sich auf die sowohl ökologisch als auch ökonomisch effiziente Aufbereitung der gesamten Altgeräte. Letztere umfassen die Effektivität der Richtlinie, unternehmerische Innovationstätigkeit zu umweltgerechtem Produktdesign zu induzieren.

Mit Blick auf die statische Effizienz ist festzustellen, dass innerhalb der WEEE-RL keine expliziten Forderungen oder Anreize zur hochwertigen Aufbereitung existieren (Atlee und Kirchain, 2006). Die Mindestzielvorgaben werden als aufzubereitender Anteil in Massenprozent angegeben ohne die Art der Aufbereitung genauer zu differenzieren. Diese Regelung eröffnet die Möglichkeit, vorgegebene Quoten ausschließlich mittels Recycling zu erfüllen. In der Folge werden zahlreiche Altgeräte recycelt, obwohl eine hochwertige Aufbereitung möglich wäre (Dindarian et al., 2012). Ein zentrales Ziel der WEEE-RL, nämlich die öko-effiziente Verwertung der Altprodukte, wird somit nicht erreicht (Atasu et al., 2009).

Als Ursache für die dynamische Ineffizienz wird auf die innerhalb der WEEE-RL und deren nationalen Umsetzungen gewährte Wahlfreiheit zwischen kollektiver und individueller Sammlung (WEEE-RL, 2012, Art. 12, Nr. 3) verwiesen (Özdemir et al., 2012). In der vorherrschenden Sammelpraxis werden die Altprodukte durch Drittunternehmen gesammelt und daraufhin dem Recycling zugeführt. Dies schränkt den Innovationsanreiz für wiederaufbereitungsorientiertes Produktdesign ein (Kunz et al., 2014; Özdemir et al., 2012) und begünstigt „Free-Rider“, die gegenüber innovativen Unternehmen Wettbewerbsvorteile erzielen können (Atasu und Subramaniam, 2012). Diese Effizienzverluste wurden bereits bei der Einführung der Richtlinie vorhergesagt (Dopfer et al., 2004; Toffel, 2003) und werden ex-post bestätigt (Atasu und Subramaniam, 2012). Im Weiteren verstärken kollektive Rücknahmesysteme ebenso die beschriebenen statischen Ineffizienzen. Für die beauftragten Drittunternehmer besitzen die Altgeräte kaum Mehrwert als Quelle für Ersatzteile oder Sekundärbau- teile. Zudem besitzen diese Unternehmen häufig nicht die notwendigen Ressourcen oder Fähigkeiten, um die Produkte hochwertig aufzubereiten. In der Konsequenz führt eine kollektive Sammelpraxis ebenso zu unnötig hohen Recyclingraten.

3. Unternehmerische Praxis und Herausforderungen

Nachfolgend wird die aktuelle europäische Sammelpraxis von IT-Herstellern skizziert. Im darauf folgenden Schritt werden rechtliche und ökonomische Treiber und Hemmnisse für die Entwicklung von Kreislaufwirtschaftssystemen beschrieben, die zu der aktuellen Struktur der Sammlung und Aufbereitung in Europa führen.

3.1 Praxis der Sammlung und Aufbereitung

Es wurde aufgezeigt, dass der legislative Druck zur hochwertigen Aufbereitung von WEEE innerhalb Europas fehlt. Aufgrund ökonomischer Erwägungen könnten die Hersteller jedoch freiwillig eigene Rücknahmesysteme initiieren, was *ceteris paribus* zu einer teilweisen Beseitigung der Ineffizienzen führen würde. Ökonomische Erwägungen umfassen vor allem die Profitabilität der individuellen Rückholung und Aufbereitung unter der Voraussetzung, dass entsprechende externe oder unternehmensinterne Absatzmärkte existieren (Nuss et al., 2015). Darüber hinaus können weitere strategische Erwägungen, wie beispielsweise der Schutz des eigenen Primärmarktes, die Etablierung eines grünen Unternehmensimages oder die Vermeidung antizipierter rechtlicher Auflagen eine zentrale ökonomische Motivation darstellen (Ferguson und Toktay, 2006; Heese et al., 2005).

In der Realität verlassen sich IT-Hersteller auf den europäischen Märkten in weiten Teilen auf die Teilnahme an kollektiven Rücknahmesystemen und scheuen die umfangreiche Etablierung eigener Systeme. IT-Hersteller (z.B. Dell, Apple, HP, Fujitsu und IBM) bieten in der Regel zwar ein Rücknahmeprogramm an, ein genauer Blick offenbart jedoch, dass über diese Programme vergleichsweise kleine Mengen abgewickelt werden und die Aufbereitungskapazitäten nur wenige Tausend Tonnen im Jahr betragen (Informationen aus Interviews mit Unternehmens- und Verbandsvertretern). Im Vergleich zu dem europäischen Aufkommen in Sammelkategorie 3in Höhe von 537.000 Tonnen im Jahr 2013 (Eurostat, 2015) sind diese Kapazitäten zu vernachlässigen. Hersteller betrachten die Produktrücknahme in erster Linie als Compliance-Thema und fokussieren auf eine kostenminimale Umsetzung (Geyer und Jackson, 2004). Keiner der IT-Hersteller investiert in signifikantem Umfang in eigene Kreislaufwirtschaftssysteme. Da eine umfangreiche Rückholung und hochwertige Aufbereitung der Altprodukte in erster Linie von den Herstellern selbst im Rahmen eigener Rücknahmesysteme ausgehen muss, ist der Anteil der Produkte, die einer hochwertigen Behandlung unterzogen werden, gering. Die Quote des WEEE, die einer hochwertigen Aufbereitung zugeführt werden, liegt bei 3–4 Prozent (Eurostat, 2015; Quariguasi Frota Neto und Bloemhof, 2012).

3.2 Treiber und Hemmnisse einer hochwertigen Aufbereitung

Im vorangegangenen Kapitel wurde gezeigt, dass eine hochwertige Aufbereitung von IT-Equipment auf dem europäischen Markt derzeit nur in sehr geringem Umfang stattfindet. Die Zurückhaltung der Hersteller beim Aufbau eigener Sammelsysteme ist insofern bemerkenswert, als dass sie einer solchen Praxis grundsätzlich positiv gegenüber stehen (Özdemir et al., 2012). Aufschlussreich ist diesbezüglich ein vergleichender Blick in geographische Regionen, die über große Binnenmärkte verfügen. So nehmen in den USA rund 90 Prozent der IT-Hersteller ihre Altgeräte zur hochwertigen Wiederaufbereitung zurück, obwohl dies bis auf wenige Ausnahmen nicht gesetzlich gefordert ist (Quariguasi Frota Neto und van Wassenhove, 2013). Da die hohen

Eine quantitative Analyse europäischer Richtlinien und Verordnungen ZfU 1/2016, 37–69 zur Abfall- und Kreislaufwirtschaft am Beispiel der Elektro- und Elektronikindustrie

Investitionen in Sammel- und Aufbereitungsnetzwerke erst bei der Ausschöpfung umfangreicher Skaleneffekte rentabel sind (Zoeteman et al., 2009), könnte dieses hohe freiwillige Unternehmensengagement auf die Größe des US-Binnenmarktes und der damit einhergehenden großen Massenströme zurückzuführen sein.

Ist es möglich, dass der europäische Binnenmarkt mit rund 500 Millionen Konsumenten und einer Wirtschaftskraft (BIP) in Höhe von 13.944 Mrd. Euro im Jahr 2014 (Eurostat, 2015) die Realisierung entsprechender Skaleneffekte nicht ermöglicht? Hierbei wird darauf verwiesen, dass für WEEE kein einheitlicher Binnenmarkt auf europäischer Ebene etabliert wurde. Bisher werden lediglich 6 Prozent der WEEE über Grenzen innerhalb Europas transportiert (Eurostat, 2015). Als Gründe werden in der betrieblichen Praxis immer wieder zentrale rechtliche Hürden und (wahrgenommene) Grauzonen im Zusammenhang mit der transnationalen Verbringung angeführt. Diese Argumente werden im Rahmen wissenschaftlicher Beiträge (Kunz et al., 2014; Quariguasi Frota Neto und van Wassenhove, 2013; Williams et al., 2008) und seitens der Exekutive selbst (Anlaufstellen-Leitlinie 1, 2007; Anlaufstellen-Leitlinie 4, 2007) gestützt. Insbesondere wurde in Gesprächen mit unternehmerischen Entscheidungsträgern mehrfach darauf hingewiesen, dass sie die immanente Gefahr der illegalen Verbringung bei der transnationalen Rückholung von WEEE durch unklare Einordnung in die „grüne“ oder „gelbe“ Abfallliste sehen, es herrscht also Unklarheit darüber, wie Elektrogeräte als potentielle Abfallgemische in ihrer Gesamtheit entsprechend kategorisiert werden müssen (Williams et al., 2008; Interview mit Praxispartner). So sind beispielsweise bei der Sammlung und Bündelung von Elektroaltgeräten eine erhebliche Kontaminierung (z.B. mit Fremdgeräten und Stoffen der „gelben“ Abfallliste) und Fehleinschätzungen bei einer meist rudimentären Initialkategorisierung am Sammlungsort nicht auszuschließen. Eine Kategorisierung dieser Geräte in die „grüne“ Abfallliste (AbfVerbrVO, 2006, Anhang III, Teil I, Buchst. d und Teil II, GC010 und GC020) ist somit nicht möglich, wodurch die Anwendung des Verfahrens der vorherigen schriftlichen Notifizierung und Zustimmung notwendig wird (Einordnung in „gelbe“ Abfallliste; vgl. AbfVerbrVO, 2006, Anhang III, Präambel und Anhang IV). Findet keine Notifizierung statt, so hat der Exporteur, in diesem Fall der Hersteller, sicherzustellen, dass die verbrachten Abfälle lediglich einer allgemeinen Informationspflicht unterliegen. Ansonsten droht die Erfüllung des Tatbestands der illegalen Verbringung, welche mit zusätzlichen Kosten für den IT-Hersteller und haftungsrechtlichen Konsequenzen verbunden ist (AbfVerbrVO, 2006, Art. 24 und 25). Die beschriebenen Unklarheiten, gepaart mit einem potentiellen finanziellen und rechtlichen Risiko, verursachen eine große Unsicherheit, die in der Praxis eine Vermeidung transnationaler Verbringungen nach sich zieht.

Durch die beschriebenen rechtlichen Restriktionen verursacht die transnationale Verbringung von Elektroaltprodukten durch die faktische Notwendigkeit einer Notifizierung und der damit verbundenen ex-ante Festlegung der Transportrouten zusätzliche direkte Kosten wie auch administrative Aufwendungen. Da bei der transnationalen Verbringung mittels Sammelnotifizierung gefordert wird, dass sowohl

Transportwege als auch Empfangsadresse bei jedem grenzüberschreitenden Transport identisch sind, sehen sich Unternehmen in diesem Fall gezwungen, in jedem Sender- und Empfängerland mindestens ein Sammel-beziehungsweise Aufbereitungszentrum zu betreiben (AbfVerbrVO, 2006, Art. 13). So wird vermutet und im Folgenden untersucht, dass diese impliziten Zwänge und die damit verbundenen Fixkosten die herstellereigene Sammlung von WEEE gerade in kleineren Ländern ökonomisch unrentabel machen und damit letztlich verhindern.

Zusammenfassend wurde der Zielkonflikt innerhalb der einzelnen Regelungen des europäischen Abfall- und Kreislaufrechts, insbesondere zwischen der WEEE-RL und der AbfVerbrVO, identifiziert. Es wird davon ausgegangen, dass die Gesetzgebung zur transnationalen Abfallverbringung eine internationale Bündelung der Aufbereitungsaktivitäten behindert und somit ein zusätzliches Hemmnis für die Schaffung eigener Rücknahmesysteme darstellt. Diese Hypothese wird im Folgenden mithilfe eines mathematischen Optimierungsmodells untersucht.

4. Quantitative Analyse eines europäischen Sammel- und Aufbereitungsnetzwerks

Im Rahmen der quantitativen Analyse wird ein zweistufiges, europäisches Rückhol- und Aufbereitungsnetzwerk für WEEE aus der Sicht eines Herstellers entwickelt. Das mathematische Modell sowie die anschließende Szenarioanalyse basiert auf vorherigen Arbeiten der Autoren (Stindt und Nuss, 2014; Stindt et al., 2014). Vorab wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Forschung im Bereich des Reverse Network Design gegeben.

4.1 Reverse Network Design im Überblick

Während theoretische Grundlagen zu Kreislaufwirtschaftssystemen zusammen mit den legislativen Rahmenbedingungen bereits in Kapitel 2 besprochen wurden, fokussiert sich der folgende Abschnitt auf quantitative Modelle zum Reverse Network Design. Reverse Network Design bezeichnet die strategische Gestaltung eines Rücknahmenetzwerks, welches Sammelzentren, Transportwege und Aufbereitungszentren umfasst (Akcali et al., 2009; Fleischmann et al., 1997). Dabei wird zur Analyse solcher Netzwerke in der Regel auf quantitative Entscheidungsunterstützungsmodelle (z. B. gemischt-ganzzahlige Optimierung, Goal Programming) aus dem Fachbereich des Operations Research zurückgegriffen (eine Übersicht über die gängigen Optimierungsmethoden wird in Akcali et al. (2009) gegeben). Unter dem Eindruck zunehmender gesellschaftlicher Sensibilität für die umweltgerechte Abfallbehandlung, steigendem legislativen Druck und potentiellen ökonomischen Vorteilen konnte dieses Themenfeld in den vergangenen Jahren ein zunehmendes Interesse in Industrie und Forschung verzeichnen. Im Folgenden wird ein Überblick über relevante wissenschaftliche Publikationen zum Reverse Network Design im Kontext der WEEE-RL

Eine quantitative Analyse europäischer Richtlinien und Verordnungen ZfU 1/2016, 37–69 zur Abfall- und Kreislaufwirtschaft am Beispiel der Elektro- und Elektronikindustrie

gegeben. Für einen umfassenden Überblick zu Reverse Network Design Modellen im Allgemeinen sei auf Chanintrakul et al. (2009), Fleischmann et al. (1997), Govindan et al. (2015) sowie auf Rubio et al. (2008) verwiesen.

Elektrische und elektronische Geräte sind Gegenstand zahlreicher Publikationen, die entweder WEEE in Ihrer Gesamtheit analysieren (Nagurney und Toyasaki, 2005; Quariguasi Frota Neto et al., 2010) oder sich einzelnen Produktkategorien, wie Waschmaschinen (Alumur et al., 2012; Tuzkaya et al., 2011), Computern (Kumar und Craig, 2007; Shih, 2001), Mobiltelefonen (Franke et al., 2006; Hanafi et al., 2008), Kopiergeräten (Amin und Zhang, 2013; Kerr und Ryan, 2001), Kühlgeräten (Krikke et al., 2003) oder medizinischen Gerätschaften (Pishvaei und Razmi, 2012) zuwenden. Die Studien unterscheiden sich des Weiteren bezüglich der Berücksichtigung verschiedener Aufbereitungsoptionen. So beschränken Nagurney und Toyasaki (2005) ihr Modell auf das Recycling von elektronischen Abfällen. Franke et al. (2006) hingegen untersuchen lediglich Remanufacturing-Strategien. Im Gegensatz dazu präsentieren Quariguasi Frota Neto et al. (2010) ein multikriterielles Zielsystem, welches neben den ökonomischen auch die ökologischen Effekte diverser Aufbereitungsoptionen einbezieht. Insbesondere zeigen sie, dass ein Recycling von WEEE die schlechteste Ökobilanz aufweist. In Eskandarpour et al. (2013) wird ein weiteres Beispiel für multikriterielle Optimierung am Beispiel eines iranischen Dienstleisters dargestellt. Darüber hinaus führte das Fraunhofer IML zahlreiche Netzwerkdesign-Projekte für verschiedene Produktgruppen, wie Fotokameras, Kühlgeräte und IT-Hardware durch (Hansen, 2000).

Die bisher genannten Studien betrachten zwar WEEE-Güter, klammern die rechtlichen Rahmenbedingungen jedoch weitestgehend aus. Die folgenden Untersuchungen hingegen beziehen die rechtlichen Rahmenbedingungen ein beziehungsweise haben diese zum zentralen Untersuchungsgegenstand. Dindarian et al. (2012) zeigen, dass die WEEE-RL zum Recycling motiviert und somit die Menge der Güter, die einer hochwertigen Aufbereitung zugeführt werden könnten, reduziert. Sie sprechen sich unter anderem für die Einführung von Steuervorteilen für aufbereitete Güter oder eine Priorisierung dieser bei staatlichen Beschaffungsaufträgen aus. In der Darstellung von Hammond und Beullens (2007) wird die WEEE-RL durch die explizite Modellierung von Mindestrücknahmemengen und Deponierungskosten sowie der Berücksichtigung von unterschiedlichen Aufbereitungsoptionen (Reuse, Remanufacturing und Recycling) abgebildet. Walther und Spengler (2005) untersuchen die Veränderung der recycling-bezogenen Mengenströme innerhalb des Bundeslands Niedersachsen unter dem Einfluss des ElektroG. Ihre Analyse basiert auf einem mehrstufigen Flussmodell, dass die effiziente Zuordnung der Altgeräte auf verschiedenen Akteure (z. B. Sammler, Aufbereiter, Recycler) und Aufbereitungskanäle in einem kollektiven Sammelsystem verfolgt. Auf Basis desselben Anwendungsfalls wird in Spengler und Walther (2005) ein Konzept zur Bewertung unterschiedlicher Implementierungen des ElektroG präsentiert. Die Analyse von Gomes et al. (2011) zielt darauf ab, Standorte für die Bündelung und Sortierung des kollektiv gesammelten

WEEE in Portugal zu bestimmen. In ähnlicher Form werden Rücknahmenetzwerke für Australien (Hanafi et al., 2008) sowie die US-Bundesstaaten Georgia (Hong et al., 2006) und Texas (Assavapokee und Wongthatsanekorn, 2012) vorgestellt. Stellvertretend für weniger entwickelte Staaten analysiert Srivastava (2008) den Status Quo der Produktrücknahme in Indien.

Auffällig ist, dass die überwiegende Zahl der Studien einen nationalen oder regionalen Fokus hat. Europaweite Netzwerke wurden hingegen in den Arbeiten von Fleischmann et al. (2001), Krikke et al. (2003) und Quariguasi Frota Neto et al. (2008) untersucht. Lee und Dong (2008) sowie Lee et al. (2010) erweitern den geographischen Fokus und wenden ihre Modelle auf einen global agierenden Computerhersteller an. Den international ausgerichteten Studien ist jedoch gemeinsam, dass rechtliche Rahmenbedingungen der transnationalen Abfallverbringung keine Berücksichtigung finden.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass lediglich eine kleine Anzahl an Veröffentlichungen Reverse Network Design unter expliziter Berücksichtigung der rechtlichen Rahmenbedingungen thematisiert. Insbesondere fehlen länderübergreifende Untersuchungen, welche die grenzüberschreitende Verbringung von Altgeräten berücksichtigen und die Auswirkungen der entsprechenden Gesetze bewerten. Darüber hinaus sind herstellereigene Reverse-Netzwerke nur selten untersucht worden. Berücksichtigt man die hohe Unsicherheit der Praxis im Umgang mit WEEE, so muss man sich abschließend dem Urteil von Atasu und van Wassenhove (2012) anschließen, dass der Zusammenhang zwischen den legislativen Rahmenbedingungen der Altgeräteverwertung und deren Implikationen für die Hersteller bisher nicht ausreichend untersucht wurde.

4.2 Modellbeschreibung

Für den Zweck der quantitativen Analyse wurde ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsmodell entwickelt. Das Modell berechnet die gewinnmaximierende Ausgestaltung eines zweistufigen Sammel- und Aufbereitungsnetzwerks, bestehend aus Sammelzentren (SZ) und Aufbereitungszentren (AZ). Dabei wird davon ausgegangen, dass der Hersteller ausschließlich von Geschäftskunden sammelt, da aufgrund der großen Mengen und der hohen Qualität der Rückläufer hier das höchste ökonomische Potential vermutet wird. Dieser Massenstrom repräsentiert etwa ein Fünftel des gesamten Aufkommens (Zoeteman et al., 2009). Die zentralen Entscheidungen des Modells (siehe Tabelle 1) umfassen die Festlegung darüber, aus welchen Regionen der Hersteller selbst sammelt und für welche er einen Dienstleister engagiert (Δ_r^w) sowie die Standortbestimmung von Sammelzentren (O_{ra}^{SZ}) und Aufbereitungszentren (O_{rb}^{AZ}). Darüber hinaus werden die Transportwege zwischen den Aufkommensregionen und den Sammelzentren (W_{rs}) sowie zwischen den Standorten untereinander (Z_{rsq}) festgelegt. Die diskutierten rechtlichen Rahmenbedingungen aus der WEEE-RL und der AbfVerbrVO finden sich sowohl in der Zielfunktion als auch

Eine quantitative Analyse europäischer Richtlinien und Verordnungen ZfU 1/2016, 37–69 zur Abfall- und Kreislaufwirtschaft am Beispiel der Elektro- und Elektronikindustrie

in den Nebenbedingungen des Modells wieder. So ist die in der WEEE-RL definierte erweiterte Herstellerverantwortung durch einen Zwang zur Sammlung abgebildet und schlägt sich bei Fremdsammlung als Kostenblock in der Zielfunktion nieder. Die AbfVerbrVO wird in der Zielfunktion durch entsprechende Kosten der Notifizierung, die bei grenzüberschreitendem Transport anfallen, integriert. Darüber hinaus stellen die Nebenbedingungen sicher, dass in jedem Senderland mindestens ein Sammelzentrum errichtet wird, um sowohl die Transportwegfixierung als auch die Anforderungen einer Notifizierung zu berücksichtigen.

Tabelle 1: Entscheidungsvariablen

Entscheidungsvariable	Beschreibung
$O_{ra}^{SZ} \in \{0,1\}$	Öffnung eines SZ in Region r ($r \in R$) mit Technologie a ($a \in A$)
$O_{rb}^{AZ} \in \{0,1\}$	Öffnung eines AZ in Region r ($r \in R$) mit Technologie b ($b \in B$)
$\Pi_{lm} \in \{0,1\}$	Notifizierung von Land l nach Land m ($l, m \in L$)
$W_{rs} \in \{0,1\}$	Sammlung des gesamten Aufkommens in Region r und Transport nach Region s ($r, s \in R$)
$\Delta_r^W \in \{0,1\}$	Sammlung und Verwertung des gesamten Aufkommens in Region r ($r \in R$) durch Drittunternehmen
X_{ra}	Menge an Altprodukten, welche in SZ in Region r ($r \in R$) mit SZ-Technologie a ($a \in A$) sortiert wird
Y_{rq}	Menge an Altprodukten der Qualitätsstufe q ($q \in Q$), die SZ in Region r ($r \in R$) generiert wird
Δ_{rq}^V	Menge an Altprodukten der Qualitätsstufe q ($q \in Q$) aus SZ in Region r ($r \in R$), die von Drittunternehmen verwertet wird
Z_{rsq}	Menge an Altprodukten der Qualitätsstufe q ($q \in Q$), die von SZ in Region r nach AZ in Region s ($r, s \in R$) transportiert wird

Im Folgenden werden die weiteren Eigenschaften des Modells beschrieben. Der geographische Untersuchungsgegenstand erstreckt sich auf 26 Mitgliedsstaaten der Europäischen Union, da Bulgarien und Zypern aufgrund unzureichender Datenlage exkludiert wurden. Eine granulare regionale Unterteilung wurde auf Basis der NUTS-2-Klassifikation des europäischen Statistikamtes vorgenommen. Diese Klassifikation bietet eine ausreichende Regionalisierung sowie die Verfügbarkeit amtlicher Statistiken. Die NUTS-2-Regionen sind die Grundlage für alle geographischen Entscheidungen des Modells bezüglich Sammlungsaktivitäten und Standortbestimmung.

Für die Länder und deren Regionen, die Sammel- und Aufbereitungstechnologien als auch für die Qualitätsstufen der Rückläufer wurden für den Zweck der mathematischen Optimierung entsprechende Indexsets angelegt (Tabelle 2). Menge L enthält die 26 betrachteten EU-Staaten und Menge R die zugehörigen 254 Regionen. In der Indexmenge Q sind die Qualitätsstufen des WEEE hinterlegt. Aus Komplexitätsgrün-

den und um die Lösbarkeit des Modells sicherzustellen werden zwei Qualitätsstufen modelliert: Recyclingfähige Geräte (Ausprägung "*Rec*") und Geräte, welche sich für eine hochwertige Aufbereitung eignen (Ausprägung "*Hoch*"). Menge *A* beschreibt die zur Verfügung stehenden Technologiekonfigurationen der SZ. Es wird zwischen einer einfachen Sortierung zum Zweck des Recyclings (Ausprägung "*Sort*") und einer vollständigen Inspektion, Sortierung und Überprüfung (Ausprägung "*Insp*"), wobei auch Geräte zur hochwertigen Aufbereitung identifiziert werden, unterschieden. Ähnlich verhält es sich mit den in Menge *B* zusammengefassten Technologiekonfigurationen der AZ: Eine niedrige Technologiestufe zielt auf eine Demontage der Geräte mit anschließendem Recycling ab (Ausprägung "*Dem*"), während die hochwertige Aufbereitung einer höheren Technologiestufe bedarf (Ausprägung "*Voll*").

Tabelle 2: Indexmengen

Indexmenge	Beschreibung
$L = \{1, \dots, N_l\}$	Länder, $ L = 26$
$R = \{1, \dots, N_r\}$	Regionen, $ R = 254$
$Q = \{1, \dots, N_q\}$	Qualitätsstufen des Aufkommensstroms, $ Q = 2$
$A = \{1, \dots, N_a\}$	Technologien in Sammelzentren (SZ), $ A = 2$
$B = \{1, \dots, N_b\}$	Technologien in Aufbereitungszentren (AZ), $ B = 2$

Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse in die unternehmerische und politische Praxis zu ermöglichen, wurden soweit möglich Realdaten verwendet. Tabelle 3 zeigt die genutzten Parameter und gibt eine Übersicht der Datenherkunft. Ein großer Teil der Daten wurde aus historischen Werten des Praxispartners (2005–2012) und Angaben des Logistikdienstleisters abgeleitet. Das für den Hersteller regional akquirierbare Aufkommen an WEEE der Kategorie 3 (*aufk_r*) wurde auf Basis historischer Daten des Praxispartners, welche für Deutschland vorliegen, mittels eines Regressionsansatzes basierend auf den regionalen Bruttoanlageninvestitionen auf die übrigen europäischen Regionen extrapoliert. Da im Rahmen der Analyse ausschließlich Aufkommen bei Geschäftskunden betrachtet werden, ist die Wahl des Regressors Bruttoanlageninvestitionen kausal nachvollziehbar. Die resultierenden Aufkommen unterteilen sich in WEEE-fremde Rückläufer (z. B. Hausmüll) (*ant^{ents}*) und WEEE verschiedener Qualitätsstufen (*ant_{aq}*).

Einige Datensätze konnten aufgrund fehlender historischer Daten oder Geheimhaltungsvereinbarungen (z. B. Erlöse) nicht vom Praxispartner bereitgestellt werden. Diese wurden aus Sekundärquellen übernommen. Da für die Notifizierung keine einheitliche Kostenstruktur existiert, wurden hierfür diverse zuständige Behörden und Verbände konsultiert und ein Mittelwert über diese Stichprobe bestimmt (*fk⁷*).

Eine quantitative Analyse europäischer Richtlinien und Verordnungen ZfU 1/2016, 37–69
zur Abfall- und Kreislaufwirtschaft am Beispiel der Elektro- und Elektronikindustrie

Tabelle 3: Beschreibung der Daten und Parameter

Parameter	Beschreibung	Datenquelle
$allok_{rl}$	Ist 1, wenn Region r ($r \in R$) zu Land l ($l \in L$) gehört, sonst 0	—
d_{rs}^{km}	Distanz (Straßenkilometer) zwischen Region r und Region s ($r, s \in R$)	Google Maps
$aufk_r$	Aufkommen an WEEE in Region r ($r \in R$) in Kilogramm	Regression auf Basis historischer Daten des IT-Herstellers
ant_{ents}^{ents}	Anteil am WEEE-fremden Rückläufern, welcher im SZ entsorgt werden muss	Historische Daten von IT-Hersteller
ant_{aq}	Anteil am gesammelten Aufkommen, welcher in SZs mit Technologie a ($a \in A$) in Qualitätsstufe q ($q \in Q$) sortiert werden kann (Transformation)	Historische Daten von IT-Hersteller
sk	Sammelkosten für ein Kilogramm WEEE transportiert über eine Entfernung von einem Kilometer von Aufkommenspunkten zu SZ	Daten von Logistikdienstleister
tk	Transportkosten (FTL) für ein Kilogramm WEEE über eine Entfernung von einem Kilometer von SZ zu AZ	Daten von Logistikdienstleister
erl_q^{SZ}	Erzielbare Erlöse für ein Kilogramm wiederaufbereitetes WEEE der Qualitätsstufe q ($q \in Q$) in SZ (Verkauf an Drittunternehmen)	Ongondo et al. (2011); Marktdaten für Rohstoffe
erl_q^{AZ}	Erzielbare Erlöse für ein Kilogramm wiederaufbereitetes WEEE der Qualitätsstufe q ($q \in Q$) in AZ	Srivastava und Srivastava (2006); Williams et al. (2008)
vk^{NS}	Variable Kosten für ein Kilogramm WEEE bei Nichtsammlung (Abholung und Verwertung durch Drittunternehmen)	Historische Daten von IT-Hersteller
vk_{ents}^{ents}	Variable Kosten für ein Kilogramm WEEE, welches in SZ entsorgt wird	Historische Daten von IT-Hersteller
vk_a^{SZ}	Variable Kosten für ein Kilogramm WEEE, welches in SZ mit Technologie a ($a \in A$) behandelt wird	Historische Daten von IT-Hersteller
vk_q^{AZ}	Variable Kosten für ein Kilogramm WEEE der Qualitätsstufe q ($q \in Q$), welches in AZ wiederaufbereitet bzw. demontiert wird	Historische Daten von IT-Hersteller
fk^{Π}	Kosten für Notifizierung	Primärdatenerhebung von Verbänden & Behörden
fk_a^{SZ}	Fixe Kosten für SZ mit Technologie a ($a \in A$)	Pishvae und Torabi (2010)
fk_b^{AZ}	Fixe Kosten für AZ mit Technologie b ($b \in B$)	Alumur et al. (2012); Pishvae und Torabi (2010)
$BigM$	Ausreichend große Zahl	—

Der Hersteller wird ein eigenes Sammlungs- und Aufbereitungsnetzwerk aufbauen, wenn dies eine profitable Investition darstellt. Daher wird eine Profitmaximierung als Differenz zwischen Erlösen und den entstehenden Kostenverfolgt:

Zielfunktion

$$\begin{aligned}
 \text{maximiere } & \underbrace{\left(\sum_r \sum_s \sum_q Z_{rsq} \cdot \text{erl}_q^{AZ} \right)}_{\text{Erlöse in AZ}} + \underbrace{\left(\sum_r \sum_q \Delta_{rq}^Y \cdot \text{erl}_q^{SZ} \right)}_{\text{Erlöse in SZ}} \\
 & - \underbrace{\left(\sum_r \sum_s \sum_q Z_{rsq} \cdot vk_q^{AZ} \right)}_{\text{Variable Kosten in AZ}} - \underbrace{\left(\sum_r \sum_a X_{ra} \cdot vk_a^{SZ} \right)}_{\text{Variable Kosten in SZ}} \\
 & - \underbrace{\left(\sum_r \sum_a O_{ra}^{SZ} \cdot fk_a^{SZ} \right)}_{\text{Fixkosten für SZ}} - \underbrace{\left(\sum_r \sum_b O_{rb}^{AZ} \cdot fk_b^{AZ} \right)}_{\text{Fixkosten für AZ}} - \underbrace{\left(\sum_r \Delta_r^W \cdot vk^{NS} \right)}_{\text{Kosten für Fremdsammlung}} \\
 & - \underbrace{\left(\sum_r \sum_a X_{ra} \cdot \text{ant}^{ents} \cdot vk^{ents} \right)}_{\text{Kosten für Entsorgung}} - \underbrace{\left(\sum_r \sum_s W_{rs} \cdot \text{aufk}_r \cdot d_{rs}^{km} \cdot sk \right)}_{\text{Transportkosten für Sammlung}} \\
 & - \underbrace{\left(\sum_r \sum_s \sum_q Z_{rsq} \cdot d_{rs}^{km} \cdot tk \right)}_{\text{Transportkosten von SZ zu AZ}} - \underbrace{\left(\sum_l \sum_m \Pi_{lm} \cdot fk^{\Pi} \right)}_{\text{Notifizierungskosten}}
 \end{aligned}$$

Das entwickelte mathematische Modell weist eine Reihe von Nebenbedingungen auf, welche sich generell in Bedingungen zur Flusserhaltung (I.-VIII.) sowie rechtliche, technische und organisatorische Restriktionen (IX.-XIV.) unterteilen lassen.

Das gemischt-ganzzahlige lineare Programm wurde in IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Version 12.5.1.0 implementiert und für verschiedene Szenarien optimal gelöst. Durch die Szenarioanalyse wird untersucht, unter welchen Umständen ein europäisches Netzwerk profitabel betrieben werden kann und inwieweit die rechtlichen Rahmenbedingungen die Sammel- und Aufbereitungsaktivitäten beeinflussen.

Eine quantitative Analyse europäischer Richtlinien und Verordnungen ZfU 1/2016, 37–69
zur Abfall- und Kreislaufwirtschaft am Beispiel der Elektro- und Elektronikindustrie

Tabelle 4: Nebenbedingungen

Nr.	Nebenbedingung	Verbale Erklärung
I.	$\sum_s W_{rs} \leq 1; \forall r \in R$	Sammlung in einer Region durch Hersteller entweder vollständig oder gar nicht
II.	$\Delta_r^W + \sum_s W_{rs} = 1; \forall r \in R$	Sammlung in einer Region entweder durch Hersteller oder Drittunternehmen
III.	$W_{rs} = \sum_a O_{ra}^{SZ}; \forall r \in R: r = s$	Sammlung in Region mit SZ erfolgt durch SZ
IV.	$\sum_a X_{sa} = (1 - \Delta_s^W) \cdot aufk_s + \sum_{rs} aufk_r - \sum_t W_{st} \cdot aufk_s; \forall r \in R$	Bündelung der gesammelten Aufkommen in SZ
V.	$Y_{rq} = \sum_a X_{ra} \cdot ant_{aq}; \forall r \in R, q \in Q$	Sortierung & Inspektion in SZ
VI.	$\sum_s Z_{rsq} = Y_{rd}; \forall r \in R, q \in Q: q \neq "Rec"$	Weitertransportierte Menge ist gleich transformierter Menge bei Nicht-Recycling
VII.	$\sum_s Z_{rsq} = Y_{rd} - \Delta_{rd}^Y; \forall r \in R, q \in Q: q \neq "Rec"$	Verkauf der Recyclingmengen in SZ möglich
VIII.	$\Delta_{rq}^Y = 0; \forall r \in R, q \in Q: q \neq "Rec"$	Verkauf höherwertiger Fraktionen in SZ ausgeschlossen
IX.	$W_{rs} \leq \sum_a O_{sa}^{SZ}; \forall r, s \in R$	Sammlung nur in Region mit SZ
X.	$W_{rs} \cdot alloc_{rl} \cdot alloc_{sm} \leq 0; \forall r, s \in R; l, m \in L: l \neq m$	Transnationale Sammlung verboten
XI.	$X_{ra} \leq O_{ra}^{SZ} \cdot BigM; \forall r \in R, a \in A$	Einschränkung des Transformationskanals im SZ
XII.	$Z_{rsq} \leq \sum_b O_{rb}^{AZ} \cdot BigM; \forall r, s \in R, q \in Q$	Weitertransport nur in Region mit AZ
XIII.	$Z_{rsq} \leq O_{ra}^{AZ} \cdot BigM; \forall q \in Q: q \neq "Rec"; b \in B: b = "Voll"$	Transport höherwertiger Fraktionen nur zu AZ entsprechender technischer Ausstattung
XIV.	$Z_{rsq} \cdot alloc_{rc} \cdot alloc_{sd} \leq \Pi_{cd} \cdot BigM; \forall r, s \in R; c, d \in C: c \neq d; q \in Q: q = "Rec"$	Transnationaler Transport des Recyclingstroms nur bei Notifizierung

4.3 Szenarioanalyse

Im Rahmen der Szenarioanalyse wurden insgesamt 20 Szenarien erstellt. Hierdurch werden die drei gestellten Forschungsfragen adressiert. Dies geschieht indem der Einfluss von gesetzlichen Rahmenbedingungen auf den Aufbau europaweiter Sammel- und Aufbereitungsnetzwerke analysiert wird. Die 20 Szenarien bilden sich aus der Kombination von vier Mengenszenarien mit fünflegislativen Szenarien.

Die **Mengenszenarien (MS)** skalieren die Menge der akquirierbaren Aufkommen: **Geringe Aufkommen (MS1)**, **moderate Aufkommen (MS2)**, **hohe Aufkommen (MS3)**,

sehr hohe Aufkommen (MS4). Die Verteilung der akquirierbaren Aufkommen an WEEE wird ausgehend vom Basisszenario MS2 folgendermaßen kalkuliert: $Aufkommen_{MS1} = 0,5 \cdot Aufkommen_{MS2}$; $Aufkommen_{MS3} = 1,5 \cdot Aufkommen_{MS2}$; $Aufkommen_{MS4} = 2,0 \cdot Aufkommen_{MS2}$. Diese Szenarien repräsentieren zwischen 5 und 20 Prozent der im Jahr 2013 gesammelten B2B-Rückläufer der Sammelkategorie 3 in Europa beziehungsweise 0,8 bis 3,4 Prozent des insgesamt gesammelten Abfalls dieser Sammelkategorie (Eurostat, 2015). Die Unterscheidung in einzelne Mengenszenarien wurde vorgenommen, um Herstellern unterschiedlicher Größe Rechnung zu tragen. So können beispielsweise große Hersteller mit relativ hohen Primärabsatzmengen eine hohe Rückläufermenge erwarten.

Im Rahmen der **legislativen Szenarien (LS)** werden verschiedene Anforderungen an eine transnationale Abfallverbringung unterstellt:

Nationale Märkte (LS1): Es wird davon ausgegangen, dass Unternehmen die transnationale Verbringung von WEEE scheuen. Entsprechend ist die Möglichkeit zur transnationalen Verbringung restringiert. Dieses Szenario zeigt die Netzwerkgestaltung in nationalen Märkten, spiegelt in weiten Teilen das aktuelle Verhalten der Marktteilnehmer wider und repräsentiert damit den Status Quo.

Eingeschränkter Binnenmarkt – Vollnotifizierung (LS2): Unternehmen steht die Möglichkeit zur transnationalen Verbringung zwischen Sammel- und Aufbereitungszentren mittels einer Sammelnotifizierung offen. Allerdings befürchten die Entscheider, dass die Aufsichtsbehörden eine Kontaminierung der Transportmengen mit notifizierungspflichtigen Abfällen feststellen und somit bei Deklaration der Elektroaltgeräte als Teil der „grünen“ Abfallliste ein Verstoß gegen die AbfVerbrVO vorliegt, wodurch der Tatbestand der illegalen Verbringung erfüllt sein könnte. Entsprechend werden sämtliche grenzüberschreitenden Transportmengen, unabhängig davon, ob diese dem Reuse oder dem Recycling zugeführt werden, notifiziert. Eine direkte grenzüberschreitende Sammlung darf nicht erfolgen.

Eingeschränkter Binnenmarkt – Teilnotifizierung (LS3): Es gelten die gleichen Bedingungen wie im vorherigen Szenario, allerdings muss WEEE, welcher ausschließlich zum Zweck einer hochwertigen Aufbereitung transnational verbracht wird, in Einklang mit der AbfVerbrVO nach Inspektion, Sortierung und Prüfung in den Sammelzentren nicht notifiziert werden.

Semi-vollständiger Binnenmarkt (LS4): In diesem Szenario wird es Herstellern ermöglicht, durch eine fixe Gebührenzahlung komplette Regionen für eine grenzüberschreitende Sammlung zu notifizieren, ohne ein Sammelzentrum im Senderland errichten zu müssen.

Vollständiger Binnenmarkt (LS5): Es wird davon ausgegangen, dass die Restriktionen, die sich für WEEE aus der AbfVerbrVO ergeben, keine Gültigkeit besitzen. Es entsteht ein vollständiger Binnenmarkt in Europa, in dem der grenzüberschreitende Transport inklusive Sammlung für alle WEEE-Fraktionen ohne Auflagen oder Notifi-

Eine quantitative Analyse europäischer Richtlinien und Verordnungen ZfU 1/2016, 37–69 zur Abfall- und Kreislaufwirtschaft am Beispiel der Elektro- und Elektronikindustrie

zierung erfolgt. Ein solches Szenario könnte in der realpolitischen Umsetzung durch eine Umklassifizierung des WEEE von Abfall zu Produkten erfolgen.

Die Ergebnisse der Szenarioanalyse sind in Tabelle 5 zusammengefasst:

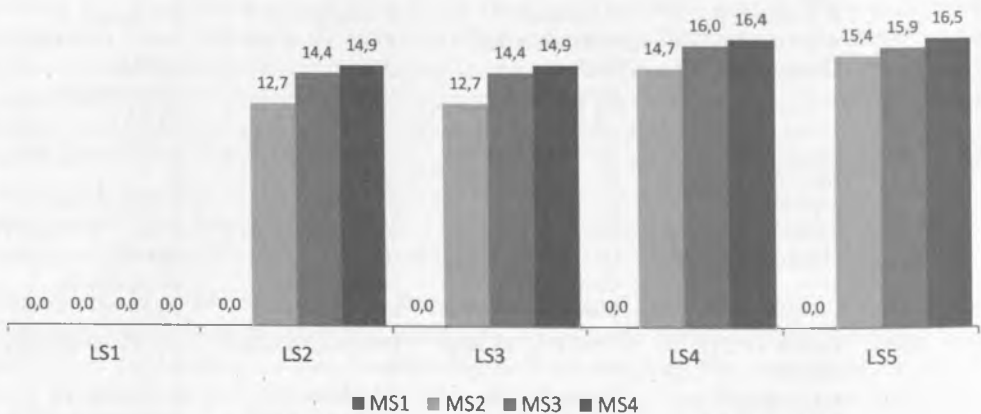
Tabelle 5: Ergebnisse der Szenarioanalyse

<i>Mengenszenarien (MS)</i>				
	MS1	MS2	MS3	MS4
<i>Legislative Szenarien (LS)</i>	LS1	Profit: -0,277 Mio. € # Länder: 0 # SZ: 0; # AZ: 0 Gesammelt: 0 %	Profit: -0,554 Mio. € # Länder: 0 # SZ: 0; # AZ: 0 Gesammelt: 0 %	Profit: -0,831 Mio. € # Länder: 0 # SZ: 0; # AZ: 0 Gesammelt: 0 %
	LS2	Profit: -0,277 Mio. € # Länder: 0 # SZ: 0; # AZ: 0 Gesammelt: 0 %	Profit: 0,706 Mio. € # Länder: 7 # SZ: 8; # AZ: 1 (FR10) Gesammelt: 74,62 %	Profit: 4,108 Mio. € # Länder: 11 # SZ: 15; # AZ: 1 (FR10) Gesammelt: 84,94 %
	LS3	Profit: -0,277 Mio. € # Länder: 0 # SZ: 0; # AZ: 0 Gesammelt: 0 %	Profit: 0,765 Mio. € # Länder: 7 # SZ: 8; # AZ: 1 (FR10) Gesammelt: 74,62 %	Profit: 8,187 Mio. € # Länder: 12 # SZ: 18; # AZ: 1 (FR10) Gesammelt: 87,45 %
	LS4	Profit: -0,277 Mio. € # Länder: 0 # SZ: 0; # AZ: 0 Gesammelt: 0 %	Profit: 1,445 Mio. € # Länder: 17 # SZ: 8; # AZ: 1 (NL42) Gesammelt: 86,40 %	Profit: 8,295 Mio. € # Länder: 12 # SZ: 18; # AZ: 1 (FR10) Gesammelt: 87,45 %
	LS5	Profit: -0,277 Mio. € # Länder: 0 # SZ: 0; # AZ: 0 Gesammelt: 0 %	Profit: 1,787 Mio. € # Länder: 20 # SZ: 9; # AZ: 1 (BE22) Gesammelt: 90,79 %	Profit: 5,237 Mio. € # Länder: 24 # SZ: 13; # AZ: 1 (NL42) Gesammelt: 94,14 %
			Profit: 9,531 Mio. € # Länder: 25 # SZ: 17; # AZ: 1 (NL42) Gesammelt: 96,18 %	Profit: 9,868 Mio. € # Länder: 25 # SZ: 16; # AZ: 1 (BE22) Gesammelt: 96,91 %

Die Ergebnisse zeigen, dass die Hersteller im Status Quo (LS1), der durch Rechtsunsicherheit und die Vermeidung transnationaler Verbringungen geprägt ist, keinen ökonomischen Anreiz zur eigenständigen Sammlung und Aufbereitung besitzen. Selbst sehr große Hersteller (MS4) können in den großen europäischen Volkswirtschaften keine ausreichende Menge an WEEE akquirieren, um die notwendigen Skaleneffekte zu realisieren. Kleine Hersteller (MS1) würden in keinem der dargestellten legislati-

ven Szenarien ein Sammel- und Aufbereitungsnetzwerk aus ökonomischem Antrieb betreiben. Für mittlere und große Hersteller (MS2-MS4) ist eine Kreislaufstrategie unter den gegebenen Umständen rentabel, soweit sie die Handlungsspielräume, die ihnen die Gesetzgebung lässt, nutzen und die notwendigen administrativen Wege beschreiten (LS2, LS3). Naturgemäß steigt die Sammelquote mit zunehmender Liberalisierung der Transportrestriktionen (LS4, LS5). Die Schaffung eines semi-vollständigen Binnenmarkts führt zu einer ökonomischen und ökologischen Verbesserung im Einklang mit den Zielen der WEEE-RL, da ein höherer Anteil des WEEE hochwertig aufbereitet wird (LS4). Wird WEEE, welches einer Verwertung zugeführt werden sollen, aus dem Anwendungsbereich der AbfVerbrVO exkludiert, führt dies zu einer zusätzlichen, wenn auch geringfügigen Verbesserung der Ergebnisse (LS5). Beispielhaft wird in der Szenariokombination LS5/MS4 in beinahe allen EU-Ländern durch den Hersteller gesammelt. Dies führt zu einem Eigensammlungsanteil von knapp 97 Prozent der verfügbaren Altgeräte. Lediglich in Malta wird ein Dienstleister mit der Sammlung und Aufbereitung beauftragt. Der Anteil der hochwertig aufbereiteten Geräte variiert entsprechend der unterschiedlichen Szenariokombinationen (Abbildung 4).

Abbildung 4: Anteil an hochwertig aufbereitetem WEEE [in %]



Bezüglich der resultierenden Netzwerkstrukturen ist festzuhalten, dass die Anzahl der betriebenen Sammelzentren tendenziell mit der Aufkommensmenge steigt. Werden allerdings die Transportrestriktionen innerhalb der AbfVerbrVO gelockert (LS4, LS5), so werden weniger Sammelzentren errichtet, da kein Zwang zur Errichtung eines Sammelzentrums in jedem Senderland besteht. Demgegenüber wird in allen profitablen Szenarien jeweils ein Aufbereitungszentrum der höchsten Technologiestufe errichtet. Lediglich der optimale Standort verändert sich und liegt in Abhängigkeit des legislativen Szenarios im Großraum Paris (FR10, LS3), in der Region Maas-tricht (NL42, LS4) oder Antwerpen/Hasselt (BE22, LS5). Abbildung 5 visualisiert

Eine quantitative Analyse europäischer Richtlinien und Verordnungen ZfU 1/2016, 37–69 zur Abfall- und Kreislaufwirtschaft am Beispiel der Elektro- und Elektronikindustrie

Abbildung 5: Optimales Sammel- und Aufbereitungsnetzwerk in Szenariokombination LS3/MS3



beispielhaft die Ausgestaltung des optimalen Sammel- und Aufbereitungsnetzwerks für einen mittelgroßen Hersteller (MS3) in einem eingeschränkten Binnenmarkt mit Teilnotifizierung (LS3). Grundsätzlich muss festgehalten werden, dass eine eigenständige Sammlung und Aufbereitung für zahlreiche Hersteller eine profitable Investition darstellt, soweit die rechtlichen Rahmenbedingungen ausreichende Spielräume und vor allem Rechtssicherheiten gewähren.

4.4 Diskussion der wirtschafts- und umweltpolitischen Implikationen

Die Szenarioanalyse zeigt, dass die gegenwärtige Konzentration auf nationale Märkte die Nutzung der potentiellen Größe des europäischen Binnenmarktes zur Realisierung ausreichender Skaleneffekte verhindert (LS1). Eine umfassende und hochwertige Aufbereitung findet nicht statt. Die Ziele einer umweltorientierten Wirtschaftspolitik werden somit verfehlt, da weder statische noch dynamische Effizienz erreicht wird.

Die derzeitige Beschränkung auf nationale Märkte ist dabei auf Rechtsunsicherheiten im Kontext der AbfVerbrVO zurückzuführen. Eine klare und nachvollziehbare Interpretation der Verordnung und eine damit einhergehende Rechtssicherheit für die handelnden Wirtschaftsakteure würde, wie aus den Szenarien LS2 und LS3 ersichtlich, eine Rückholungspraxis ermöglichen, die sowohl ökonomischen Zielkriterien genügt als auch die Zielsetzungen der europäischen Umweltgesetzgebung erfüllt. So können Hersteller bei einer ausreichenden Menge akquirierbarer Aufkommen (MS2-MS4) ein Sammel- und Aufbereitungsnetzwerk zur hochwertigen Aufbereitung von WEEE profitabel betreiben. Dies würde deutliche Effizienzsteigerungen im Rahmen einer umfangreichen Sammlung und Aufbereitung nach sich ziehen. Die Sammelquote beträgt hier 75 Prozent bis 88 Prozent der anfallenden B2B-Rückläufer. Eine Lockerung der AbfVerbrVO (LS4) beziehungsweise Umklassifizierung des WEEE (LS5) könnte eine weitere geringfügige Steigerung der Sammel- und Aufbereitungsquoten bewirken. Bei diesen Veränderungen der rechtlichen Rahmenbedingungen würden die Hersteller zwar in weiteren Ländern tätig werden, allerdings betragen diese Verbesserungen bezüglich der Sammelquote wenige Prozentpunkte.

Zusammenfassend ist zu konstatieren, dass die (wahrgenommene) Rechtsunsicherheit in Bezug auf die AbfVerbrVO ein substantielles Hemmnis für die Etablierung europäischer Sammel- und Aufbereitungsnetzwerke darstellt. Entsprechend werden auf Basis der quantitativen Analyse folgende Empfehlungen an die Entscheidungsträger in Politik und Verwaltung ausgesprochen: In erster Linie sind die Rechtsunsicherheiten bei der Abfallverbringung zu beseitigen. Hierzu ist ein enger Dialog mit den Herstellern zu suchen. Klare Interpretationen der Rechtslage, Verfahrensstandards und Aufklärungsaktivitäten sollten darauf abzielen, die „rechtlichen Grauzonen“ aufzulösen. Wie gezeigt wurde können hierdurch umfangreiche Effizienzgewinne realisiert werden. Eine Umklassifizierung des WEEE, sodass diese Güter innerhalb Europas als Produkte und nicht länger als Abfall verbracht werden können,

Eine quantitative Analyse europäischer Richtlinien und Verordnungen ZfU 1/2016, 37–69 zur Abfall- und Kreislaufwirtschaft am Beispiel der Elektro- und Elektronikindustrie

würde weitere Effizienzgewinne nach sich ziehen. Diese erscheinen auf den ersten Blick gering. Es ist allerdings fraglich, inwieweit diese Umsetzung der Basler Konvention innerhalb einer Wirtschaftsunion wie der EU mit weitestgehend integrierten Binnenmärkten zeitgemäß ist. Es wäre zu überlegen, die Gefahr illegaler Exporte von WEEE an den Außengrenzen der EU zu überwachen und innerhalb der EU einen freien Waren- beziehungsweise Altgeräteverkehr zu ermöglichen. Eine solche Liberalisierung würde darüber hinaus die Rechtsunsicherheiten beseitigen und zu einem integrierten europäischen Sammel- und Aufbereitungsmarkt für WEEE führen. Darüber hinaus könnte die Politik zusätzliche Absatzmärkte für aufbereitete Güter schaffen. So wird beispielsweise in den USA durch die „Executive Order 12999“ gefordert dass – soweit möglich – alle von öffentlichen Einrichtung entsorgte Computer einer hochwertigen Aufbereitung unterzogen werden, um daraufhin an Schulen weitergegeben zu werden.

In Summe werden Hersteller durch die beschriebenen Maßnahmen ermutigt, eigenständige Sammel- und Aufbereitungssysteme aufzubauen (statische Effizienz) und in der Folge verwertungskonforme Produktdesigns zu forcieren (dynamische Effizienz) (Elmer et al., 2005).

5. Fazit und Ausblick

Die vorliegende Arbeit untersucht die Auswirkungen europäischer Richtlinien und Verordnungen auf die Sammel- und Aufbereitungsaktivitäten von IT-Herstellern und leitet Implikationen und Handlungsempfehlungen für eine transnationale Umweltpolitik ab. Zu diesem Zweck werden die gegenwärtigen gesetzlichen Rahmenbedingungen vorgestellt und der Status Quo der Sammlung und Aufbereitung von WEEE mitsamt seinen Treibern und Herausforderungen vorgestellt. Im Anschluss wird ein mathematisches Modell entwickelt, das ein europäischen Sammel- und Aufbereitungsnetzwerkes aus Sicht eines Herstellers abbildet. Dieses gemischt-ganzzahlige Optimierungsmodell wird mit Daten parametrisiert, welche zu einem großen Teil aus der Kooperation mit einem Praxispartner stammen. Die anschließende Szenarioanalyse kombiniert jeweils verschiedene Ausgestaltungen der transnationalen Abfallverbringung (legislative Szenarien) mit Prognosen akquirierbarer WEEE-Aufkommen für Hersteller unterschiedlicher Größe (Mengenszenarien). Aus den Ergebnissen lassen sich Handlungsempfehlungen für unternehmerische und politische Akteure ableiten.

Aus ökonomischer Perspektive zeigt sich, dass für mittlere und große Unternehmen der Aufbau eigener Sammel- und Aufbereitungsnetzwerke auf europäischer Ebene profitabel ist. Dies besitzt insbesondere auch unter den gegebenen Anforderungen der AbfVerbrVO Gültigkeit. Dieses Ergebnis steht im Kontrast zur gegenwärtigen unternehmerischen Praxis (*Forschungsfrage 1*). Betriebliche Entscheider der IT-Industrie sollten eine Erweiterung der Unternehmensaktivitäten um Kreislaufwirt-

schaftsprozess in Erwägung zu ziehen. Hierbei kann das entwickelte mathematische Modell Hersteller bei der Planung europäischer Sammel- und Aufbereitungsnetzwerke unterstützen, wobei die optimale Strategie im konkreten Fall auf Basis unternehmensindividueller Daten zu bewerten ist.

Aus politischer Sicht offenbart die quantitative Analyse, dass die Ziele der WEEE-RL und der AbfVerbrVO teilweise konkurrieren und eine umweltpolitisch wünschenswerte Lösung in Form hochwertiger Aufbereitung behindern (*Forschungsfrage 2*). In der aktuellen unternehmerischen Praxis führt die Ausgestaltung der AbfVerbrVO zu einer Verunsicherung der involvierten Akteure, was die Implementierung von herstellereigenen Sammel- und Aufbereitungsnetzwerken hemmt. Auf diese Weise werden Effizienzverluste verursacht, da, falls die rechtlichen Rahmenbedingungen ausreichende Spielräume und vor allem Rechtssicherheiten gewähren würden, Investitionen in eigenständige Sammlung und Aufbereitung für zahlreiche Hersteller profitabel wären. In diesem Kontext präsentiert die vorliegende Arbeit in Kapitel 4.4 Handlungsempfehlungen für politische Akteure, welche eine ökonomisch und ökologisch effiziente Sammlung und Aufbereitung von WEEE in Europa ermöglicht. Grundsätzlich wird eine Vereinfachung und Konkretisierung der AbfVerbrVO empfohlen, um eine höhere Rechtssicherheit für Unternehmen zu gewährleisten. Diese Maßnahmen könnten durch eine Liberalisierung der grenzüberschreitenden Verbringung von WEEE flankiert werden (*Forschungsfrage 3*). Diese Veränderungen führen zu einer Stärkung des europäischen Binnenmarktes für werthaltige Abfallströme, wie beispielsweise WEEE, und schaffen einen starken Anreiz zum Aufbau eigener Sammel- und Aufbereitungssysteme durch die Hersteller.

Die präsentierte Arbeit lässt Raum für Erweiterungen und zukünftige Forschungsanstrengungen. Eine multikriterielle Optimierung könnte den Umwelteffekt der Sammlungs- und Aufbereitungsaktivitäten (z.B. CO₂-Emissionen) explizit in die Untersuchung miteinbeziehen. Ein solcher Ansatz wurde bereits in Stindt et al. (2014) skizziert. Weiterhin fokussiert die vorliegende Arbeit auf WEEE von Geschäftskunden (B2B). Bei der Sammlung von WEEE aus privaten Haushalten ist zu berücksichtigen, dass hier die Prognose der Rückläufer bezüglich Zeitpunkt, Menge und Qualität deutlich komplexer ist. Eine Erweiterung der Analyse um diese Aufkommensgruppe ist dennoch ein logischer Schritt und dürfte zusätzliche ökonomische und ökologische Potentiale offenlegen. Darüber hinaus ist der in der Analyse gewählte Fokus um eine Betrachtung weiterer unternehmenspolitischer Einflüsse, wie beispielsweise die grundsätzliche Bereitschaft zur Erweiterung des Kerngeschäfts oder Image-Erwägungen, zu ergänzen.

Zusammenfassend wird auf Basis der quantitativen Analyse für eine Konkretisierung und Liberalisierung der transnationalen Verbringung von WEEE innerhalb Europas plädiert, um einen starken Anreiz zum Aufbau herstellereigener Rücknahmesysteme zu schaffen und letztlich eine hochwertige und umwelteffiziente Aufbereitung zu unterstützen.

Eine quantitative Analyse europäischer Richtlinien und Verordnungen ZfU 1/2016, 37–69 zur Abfall- und Kreislaufwirtschaft am Beispiel der Elektro- und Elektronikindustrie

Literaturverzeichnis

AbfRRL (2008). *Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien*. ABl. L 312 vom 22.11.2008, 3–30.

AbfVerbrVO (2006). *Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Juni 2006 über die Verbringung von Abfällen*. ABl. L 190 vom 12.07.2006, 1–98.

Abu Bakar, M. S. und Rahimifard, S. (2008). An integrated framework for planning of recycling activities in electrical and electronic sector. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 21(6), 617–630.

Akcali, E., Cetinkaya, S. und Üster, H. (2009). Network Design for Reverse and Closed-Loop Supply Chains: An Annotated Bibliography of Models and Solution Approaches. *Networks* 53(3), 231–248.

Alumur, S. A., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F. und Verter, V. (2012). Multi-period reverse logistics network design. *European Journal of Operational Research* 220(1), 67–78.

Amin, S. H. und Zhang, G. (2013). A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied Mathematical Modelling* 37(6), 4165–4176.

Anlaufstellen-Leitlinie 1 (2007). *Anlaufstellen-Leitlinien über Verbringungen von Elektro- und Elektronik-Altgeräten*. URL: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/anlaufstellen_leitlinien_1.pdf (zugegriffen am 17.09.2015).

Anlaufstellen-Leitlinie 4 (2007). *Anlaufstellen-Leitlinien zur Klassifizierung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten und Flugasche*. URL: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/anlaufstellen_leitlinien_4_bf.pdf (zugegriffen am 17.09.2015).

Assavapokee, T. und Wongthatsanakorn, W. (2012). Reverse production system infrastructure design for electronic products in the state of Texas. *Computers & Industrial Engineering* 62(1), 129–140.

Atasu, A. und Subramanian, R. (2012). Extended Producer Responsibility for E-Waste: Individual or Collective Producer Responsibility? *Production and Operations Management* 21(6), 1042–1059.

Atasu, A. und van Wassenhove, L. N. (2012). An Operations Perspective on Product Take-Back Legislation for E-Waste: Theory, Practice, and Research Needs. *Production and Operations Management* 21(3), 407–422.

- Atasu, A., van Wassenhove, L. N. und Sarvary, M. (2009). Efficient Take-Back Legislation. *Production and Operations Management* 18(3), 243–258.
- Atlee, J. und Kirchain, R. (2006). Operational Sustainability Metrics Assessing Metric Effectiveness in the Context of Electronics-Recycling Systems. *Environmental Science & Technology* 40(14), 4506–4513.
- Cahill, R., Grimes, S. M. und Wilson, D. C. (2010). Extended producer responsibility for packaging wastes and WEEE – a comparison of implementation and the role of local authorities across Europe. *Waste Management & Research* 29(5), 455–479.
- Chancerel, P. und Rotter, S. (2009). Recycling-oriented characterization of small waste electrical and electronic equipment. *Waste Management* 29(8), 2336–2352.
- Chanintrakul, P., Mondragon, A. E. C., Lalwani, C. und Wong, C. Y. (2009). Reverse logistics network design: a state-of-the-art literature review. *International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling* 1(1), 61–81.
- de Brito, M. P. und Dekker, R. (2004). A Framework for Reverse Logistics. In: Dekker, R., Fleischmann, M., Inderfurth, K. und van Wassenhove, L. N. (Hrsg.), *Reverse Logistics – Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chains*. Berlin: Springer-Verlag, 3–28.
- Dimitrakakis, E., Janz, A., Bilitewski, B. und Gidarakos, E. (2009). Small WEEE: Determining recyclables and hazardous substances in plastics. *Journal of Hazardous Materials* 161(2–3), 913–919.
- Dindarian, A., Gibson, A. A. P. und Quariguasi Frota Neto, J. (2012). Electronic product returns and potential reuse opportunities: A microwave case study in the United Kingdom. *Journal of Cleaner Production* 32, 22–31.
- Dopfer, J., Führ, M., Hafkesbrink, J., Halstrick-Schwenk, M. und Scheuer, M. (2004). Rücknahmeverpflichtung für Elektro- und Elektronikaltgeräte – Grenzüberschreitender Direktvertrieb und seine Berücksichtigung bei der Umsetzung der EG-Richtlinie. *Zeitschrift für Umweltpolitik & Umweltrecht* 1/2004, 47–78.
- ElektroG (2015). *Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz – ElektroG)*. BGBl. Jg. 2015 Teil I Nr. 40 vom 23.10.2015, 1739–1769.
- Elmer, C.-F., Schatz, M. und von Hirschhausen, C. (2005). Effizienzanalyse der europäischen Elektroaltgeräte-Richtlinie (WEEE) sowie ihrer nationalen Umsetzungsmöglichkeiten. *Zeitschrift für Umweltpolitik & Umweltrecht* 4/2005, 513–542.
- Eskandarpour, M., Zegordi, S. H. und Nikbakhsh, E. (2013). A parallel variable neighborhood search for the multi-objective sustainable post-sales network design problem. *International Journal of Production Economics* 145(1), 117–131.
- Eurostat (2015). *Statistisches Amt der Europäischen Union*. URL: ec.europa.eu/eurostat/de.

Eine quantitative Analyse europäischer Richtlinien und Verordnungen ZfU 1/2016, 37–69 zur Abfall- und Kreislaufwirtschaft am Beispiel der Elektro- und Elektronikindustrie

Ferguson, M. E. und Toktay, L. B. (2006). The Effect of Competition on Recovery Strategies. *Production and Operations Management* 15(3), 351–368.

Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J. M. und van Wassenhove, L. N. (2001). The impact of product recovery on logistics network design. *Production and Operations Management* 10(2), 156–173.

Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Dekker, R., van der Laan, E., van Nunen, J. A. E. E. und van Wassenhove, L. N. (1997). Quantitative models for reverse logistics: A review. *European Journal of Operational Research* 103(1), 1–17.

Fleischmann, M., van Nunen, J. A. E. E. und Gräve, B. (2003). Integrating Closed-Loop Supply Chains and Spare-Parts Management at IBM. *Interfaces* 33(6), 44–56.

Franke, C., Basdere, B., Ciupek, M. und Seliger, S. (2006). Remanufacturing of mobile phones – capacity, program and facility adaptation planning. *Omega* 34(6), 562–570.

Geyer, R. und Jackson, T. (2004). Supply Loops and Their Constraints: The Industrial Ecology of Recycling and Reuse. *California Management Review* 46(2), 55–73.

Gomes, M. I., Barbosa-Povoa, A. P. und Novais, A. Q. (2011). Modelling a recovery network for WEEE: A case study in Portugal. *Waste Management* 31(7), 1645–1660.

Goosey, M. (2004). End-of-life electronics legislation – an industry perspective. *Circuit World* 30(2), 41–45.

Govindan, K., Soleimani, H. und Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research* 240, 603–626.

Hammond, D. und Beullens, P. (2007). Closed-loop supply chain network equilibrium under legislation. *European Journal of Operational Research* 183(2), 895–908.

Hanafi, J., Kara, S. und Kaebernich, H. (2008). Reverse logistics strategies for end-of-life products. *The International Journal of Logistics Management* 19(3), 367–388.

Hansen, U. (2000). Reverse Logistics is the Key for Remanufacturing and a Sustainable Development. *Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 238–242.

Heese, H. S., Cattani, K., Ferrer, G., Gilland, W. und Roth, A. V. (2005). Competitive advantage through take-back of used products. *European Journal of Operational Research* 164(1), 143–157.

Hong, I., Assavapokee, T., Ammons, J., Boelkins, C., Gilliam, K., Oudit, D., Realff, M. J., Vannicola, J. M. und Wongthatsanekorn, W. (2006). Planning the e-Scrap Reverse Production System Under Uncertainty in the State of Georgia: A Case Study. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing* 29(3), 150–162.

Jayaraman, V. und Luo, Y. (2007). Creating Competitive Advantages Through New Value Creation: A Reverse Logistics Perspective. *The Academy of Management Perspectives* 21(2), 56–73.

Johnson, J., Harper, E. M., Lifset, R. und Graedel, T. E. (2007). Dining at the Periodic Table: Metals Concentrations as They Relate to Recycling. *Environmental Science & Technology* 41(5), 1759–1765.

Kerr, W. und Ryan, C. (2001). Eco-efficiency gains from remanufacturing: A case study of photocopier remanufacturing at Fuji Xerox Australia. *Journal of Cleaner Production* 9, 75–81.

KrWG (2012). *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG)*. BGBl. Jg. 2012 Teil I Nr. 10 vom 29.02.2012, 212–264.

Krikke, H., Bloemhof-Ruwaard, J. und van Wassenhove, L. N. (2003). Concurrent product and closed-loop supply chain design with an application to refrigerators. *International Journal of Production Research* 41(16), 3689–3719.

Kumar, S. und Craig, S. (2007). Dell, Inc.'s closed loop supply chain for computer assembly plants. *Information Knowledge Systems Management* 6, 197–214.

Kunz, N., Atasu, A., Mayers, K. und van Wassenhove, L. (2014). Extended Producer Responsibility: Stakeholder Concerns and Future Developments. *INSEAD White Paper*.

Lee, D. und Dong, M. (2008). A heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 44(3), 455–474.

Lee, D., Dong, M. und Bian, W. (2010). The design of sustainable logistics network under uncertainty. *International Journal of Production Economics* 128(1), 159–166.

Mayers, C. K. (2007). Strategic, Financial, and Design Implications of Extended Producer Responsibility in Europe. *Journal of Industrial Ecology* 11(3), 113–131.

Nagurney, A. und Toyasaki, F. (2005). Reverse Supply Chain Management and Electronic Waste Recycling: A Multitiered Network Equilibrium Framework for E-Cycling. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 41(1), 1–28.

Nuss, C., Sahamie, R. und Stindt, D. (2015). The Reverse Supply Chain Planning Matrix: A Classification Scheme for Planning Problems in Reverse Logistics. *International Journal of Management Reviews* 17(4), 413–436.

ÖkoD-RL (2009). *Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte*. ABl. L 285 vom 31.10.2009, 10–35.

Özdemir, Ö., Denizel, M. und Guide, V. D. R. (2012). Recovery decisions of a producer in a legislative disposal fee environment. *European Journal of Operational Research* 216(2), 293–300.

Eine quantitative Analyse europäischer Richtlinien und Verordnungen ZfU 1/2016, 37–69 zur Abfall- und Kreislaufwirtschaft am Beispiel der Elektro- und Elektronikindustrie

Ongondo, F.O., Williams, I.D. und Cherrett, T.J. (2011). How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes. *Waste Management* 31(4), 714–730.

Oraiopoulos, N., Ferguson, M.E. und Toktay, L.B. (2012). Relicensing as a Secondary Market Strategy. *Management Science* 58(5), 1022–1037.

Pishvae, M.S. und Razmi, J. (2012). Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming. *Applied Mathematical Modelling* 36(8), 3433–3446.

Pishvae, M.S. und Torabi, S. (2010). A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Fuzzy Sets Systems* 161(20), 2668–2683.

Quariguasi Frota Neto, J. und Bloemhof, J. (2012). An Analysis of the Eco-Efficiency of Remanufactured Personal Computers and Mobile Phones. *Production and Operations Management* 21(1), 101–114.

Quariguasi Frota Neto, J., Bloemhof-Ruwaard, J.M., van Nunen, J.A.E.E. und van Heck, E. (2008). Designing and evaluating sustainable logistics networks. *International Journal of Production Economics* 111(2), 195–208.

Quariguasi Frota Neto, J. und van Wassenhove, L.N. (2013). Original Equipment Manufacturers' Participation in Take-Back Initiatives in Brazil. *Journal of Industrial Ecology* 17(2), 238–248.

Quariguasi Frota Neto, J., Walther, G., Bloemhof, J., van Nunen, J.A.E.E. und Spengler, T. (2010). From closed-loop to sustainable supply chains: the WEEE case. *International Journal of Production Research* 48(15), 4463–4481.

REACH-VO (2006). *Verordnung (EG) 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Agentur für chemische Stoffe, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission*. ABl. L 396 vom 30.12.2006, 1–851.

Reese, M. (2009). Grundprobleme des europäischen Abfallrechts und Lösungsbeiträge der neuen Abfallrahmenrichtlinie. *NVwZ – Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht* 2009, 1073–1079.

Robinson, B.H. (2009). E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. *Science of the Total Environment* 408(2), 183–191.

RoHS (2011). *Richtlinie 2011/65/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten*. ABl. L 174 vom 01.07.2011, 88–110.

- Rubio, S., Chamorro, A. und Miranda, F.J. (2008). Characteristics of the research on reverse logistics (1995–2005). *International Journal of Production Research* 46(4), 1099–1120.
- Shih, L.-H. (2001). Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan. *Resources, Conservation and Recycling* 32(1), 55–72.
- Spengler, T. und Walther, G. (2005). Wertschöpfungsnetzwerke zur Umsetzung der WEEE-Richtlinie durch KMU. *UmweltWirtschaftsForum* 13(3), 49–54.
- Srivastava, S.K. (2008). Network design for reverse logistics. *Omega* 36(4), 535–548.
- Srivastava, S.K. und Srivastava, R.K. (2006). Managing product returns for reverse logistics. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 36(7), 524–546.
- Stindt, D. und Nuss, C. (2014). Analysis of European Closed-loop Supply Chain Network for WEEE – an OEM perspective. *Proceedings of the Going Green CARE INNOVATION 2014*.
- Stindt, D., Nuss, C., Bensch, S., Dirr, M. und Tuma, A. (2014). An Environmental Management Information System for Closing Knowledge Gaps in Corporate Sustainable Decision-Making. *Proceedings of the 35th International Conference on Information Systems*.
- Stindt, D. und Sahamie, R. (2014). Review of research on closed loop supply chain management in the process industry. *Flexible Services and Manufacturing Journal* 26(1–2), 268–293.
- Toffel, M.W. (2003). The Growing Strategic Importance of End-of-Life Product Management. *California Management Review* 45(3), 102–129.
- Tuzkaya, G., Gülsün, B. und Önsel, S. (2011). A methodology for the strategic design of reverse logistics networks and its application in the Turkish white goods industry. *International Journal of Production Research* 49(15), 4543–4571.
- Walther, G. und Spengler, T. (2005). Impact of WEEE-directive on reverse logistics in Germany. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 25(5), 337–361.
- WEEE-RL (2012). *Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte*. ABl. L 197 vom 24.07.2012, 38–71.
- Williams, E., Kahhat, R., Allenby, B., Kavazanjian, E., Kim, J. und Xu, M. (2008). Environmental, Social, and Economic Implications of Global Reuse and Recycling of Personal Computers. *Environmental Science & Technology* 42(17), 6446–6454.
- Wu, Z. und Pagell, M. (2011). Balancing priorities: Decision-making in sustainable supply chain management. *Journal of Operations Management* 29(6), 577–590.

Eine quantitative Analyse europäischer Richtlinien und Verordnungen ZfU 1/2016, 37–69 zur Abfall- und Kreislaufwirtschaft am Beispiel der Elektro- und Elektronikindustrie

Zoeteman, B. C. J., Krikke, H. R. und Venselaar, J. (2009). Handling Electronic Waste Flows: On the Effectiveness of Producer Responsibility in a Globalizing World. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 47(5), 415–436.

Summary

Within this study we identify conflicting aims within the most important acts and directives on waste management and extended product responsibility. We analyze the effect of certain legislation and their interplay on the structure of OEM's recovery networks. Thereby, we show that these laws ultimately hinder or restrict high-value recovery of discarded products on a European level. This observation is in line with practitioners' experiences. To profoundly formalize the stated theses and to analyze the legislative impacts we develop a mixed-integer linear model. Beside economic aspects we incorporate legal aspects into both the constraints and the objective function. Hence, legislative elements are analyzed as central influencing factors. Based on scenarios, we examine different law designs (e.g. regarding Regulation on the Shipment of Wastes and WEEE-Directive) and their impacts on collection and actual recovery of goods. Our analyses base on real-world data that originate from a cooperation with a globally acting manufacturer for IT.